

Sr/Ca- und U/Ca-Thermometrie an Korallen (*Porites lutea*) aus dem  
Indischen Ozean

Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultäten  
der Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von  
**Dirk Wischow**  
aus Wolgast

Göttingen 1999

D 7

Referent: Prof. Dr. A. Eisenhauer

Korreferent: Prof. Dr. B. T. Hansen

Tag der mündlichen Prüfung: 04. November 1999

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Elementkonzentrationen in Korallen und Meerwasser.....</b>	<b>3</b>
2.1	Verweilzeiten von Sr, Ca und U im Meerwasser.....	4
2.2	Komplexbildung von U.....	6
2.3	Biologische und chemische Alteration .....	7
2.4	Umwelteinflüsse .....	7
2.5	Gattungs- und Art-Unterschiede .....	8
<b>3</b>	<b>Probenahme und Methodik .....</b>	<b>9</b>
3.1	Probenahme.....	9
3.2	Chemische Aufbereitung .....	11
3.3	Isotopenmessungen .....	11
3.4	Anorganische Ausfällung von Aragonit .....	13
<b>4</b>	<b>Sr/Ca- und U/Ca-Thermometrie an Korallen des West-Indiks.....</b>	<b>15</b>
4.1	Untersuchungsgebiete .....	15
4.2	Wachstumsraten .....	15
4.2.1	Einfluß der Wachstums- bzw.-Kalzifikationsrate auf das Sr/Ca-Verhältnis .....	16
4.2.2	Zeitliche Zuordnung der Element-Verhältnisse.....	19
4.3	SST-Daten.....	21
4.4	Sr/Ca- und U/Ca-SST-Beziehung.....	21
4.4.1	Sr/Ca-SST-Beziehung.....	23
4.4.2	U/Ca-SST-Beziehung .....	25
<b>5</b>	<b>Sr/Ca- und U/Ca-Thermometrie an Korallen des Ost-Indiks .....</b>	<b>26</b>
5.1	Untersuchungsgebiete .....	26
5.2	Wachstumsraten .....	27
5.3	SST-Daten.....	27
5.4	Sr/Ca- und U/Ca-SST-Beziehung.....	28
5.4.1	Sr/Ca-SST-Beziehung.....	29
5.4.2	U/Ca-SST-Beziehung .....	31
<b>6</b>	<b>Vergleich der Untersuchungsgebiete.....</b>	<b>33</b>
6.1	Sr/Ca- und U/Ca-Verhältnis im Meerwasser .....	33
6.2	Sr/Ca-SST-Beziehung .....	37
6.3	U/Ca-SST-Beziehung .....	43

<b>7</b>	<b>Anwendung der Sr/Ca- und U/Ca-Methode.....</b>	<b>45</b>
7.1	Bestimmung von SST-Daten der jüngeren Vergangenheit.....	45
7.2	Bestimmung von Paläotemperaturen .....	47
7.3	Proxies für vulkaninduzierte Signale und klimatische Ereignisse .....	53
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>57</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>59</b>
<b>10</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>68</b>
10.1	Sr/Ca vs. Reynolds- und COADS-SST der untersuchten rezenten Kerne.....	68
10.2	Sr/Ca-, U/Ca- und SST-Daten.....	70
10.3	TIMS-Messungen des hausinternen Korallen-Standards.....	77

## Abkürzungen

AAS	Atom-Absorptions-Spektrometrie
CLIMAP	Climate Mapping and Prediction
COADS	Comprehensive Ocean Atmosphere Data Set
COHMAP	Cooperative Holocene Mapping Project
ENSO	El Niño/Southern Oscillation
ICP-AES	Induktiv gekoppeltes Plasma – Atom-Emissions-Spektrometrie
LGM	Last Glacial Maximum
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
REM	Rasterelektronenmikroskop
SMOW	Standard Mean Ocean Water
SST	Sea Surface Temperature
TIMS	Thermionen-Massenspektrometer
WPWP	West Pacific Warm Pool
PFA	Perfluoroalkoxy

## 1 Einleitung

In allen Klimamodellen ist die Oberflächentemperatur des Ozeans (SST) eine wichtige Größe, da diese die Bedingungen an der Grenzschicht "Ozean-Atmosphäre" kontrolliert (Beck et al., 1992). Dabei spielen die tropischen Ozeane eine wichtige Rolle, da sie durch den Wärmeaustausch mit den Polarmeeren den globalen Energiehaushalt beeinflussen. Somit hängen die klimatischen Variablen wie Luftfeuchte, Lufttemperatur, Wolkenbedeckung, Niederschlag, ozeanische Albedo sowie ozeanische und atmosphärische Zirkulation direkt oder indirekt von der SST ab (Beck et al., 1992). Es besteht daher ein starkes Interesse, die SST der Vergangenheit - insbesondere der Tropen - zu rekonstruieren, wenn man die klimatische Entwicklung in der Zukunft voraussagen will. Darüber hinaus soll die zukünftige klimatische Entwicklung in engen Grenzen voraus gesagt werden, so daß die Gewinnung von SST-Daten mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung von entscheidender Bedeutung ist, um die Computer-gestützten Klimamodelle zu überprüfen und zu eichen.

Als SST-Thermometer dienen z.B. die Radiolarien-Taxonomie (Imbrie & Kipp, 1971, Pisias et al., 1997) und  $\delta^{18}\text{O}$ -Bestimmungen an Foraminiferen (Epstein et al., 1953, Patrick & Thunell, 1997). Potentielle SST-Proxys in Foraminiferen sind Sr/Ca- und F/Ca- (Opdyke et al., 1993, Rosenthal & Boyle, 1993) sowie Mg/Ca-Verhältnisse (Nürnberg et al., 1996, Rosenthal et al., 1997).

Ein weiterer SST-Proxy sind  $\text{U}_{37}^{\text{k}}$ -Verhältnisse in Alkenonen (Brassell et al., 1986, Zhao et al., 1995, Müller et al., 1998). Alkenone werden von einigen marinen Algen, hauptsächlich von *Emiliania huxleyi*, gebildet und sind Ketone mit einer oder mehreren doppelten Bindungen in der Kohlenstoffkette.  $\text{U}_{37}^{\text{k}}$  basiert auf dem Verhältnis der Alkenone mit 2 Doppelbindungen in der Kohlenstoffkette ( $\text{C}_{37:2}$ ) zu denen mit drei Doppelbindungen ( $\text{C}_{37:3}$ ). Zwischen  $\text{U}_{37}^{\text{k}}$  und SST besteht eine positive Korrelation.

Korallen stellen ein Klimaarchiv dar, mit dem sogar monatliche SST's rekonstruiert werden können. Dazu dienten bisher vorrangig  $\delta^{18}\text{O}$ -Bestimmungen (Fairbanks & Dodge, 1979, Paetzold, 1984, Wefer & Berger, 1991, Heiss et al., 1997). Bei Anwendung dieser Methode müssen Probenlokationen mit geringen Salinitätsschwankungen gewählt werden, da Evaporation und Niederschlag die Isotopie des Meerwassers und damit die der Koralle beeinflussen (Epstein & Mayeda, 1953).

Neben dem  $\delta^{18}\text{O}$ -Thermometer ist die Bestimmung von Elementkonzentrationen in kalzitischen und aragonitischen Foraminiferen und gebänderten aragonitischen Korallen in den letzten Jahren zu einer der effektivsten Informationsquellen über die Veränderungen des Klimas und der chemischen Zusammensetzung des Ozeans in der Vergangenheit geworden. Aus den Variationen von Elementverhältnissen wie Ba/Ca, Sr/Ca, Mn/Ca, Pb/Ca, Cd/Ca, den sogenannten "Proxies", können zeitliche Veränderungen der ozeanischen Zirkulation, des Nährstoffhaushaltes (z.B. Ba/Ca, Cd/Ca) (Lea & Boyle, 1993, Rosenthal et al., 1997), des

natürlichen bzw. anthropogenen Eintrages (z.B. Mn/Ca, Pb/Ca) (Linn et al., 1990) und die zeitliche Variation von ENSO-Ereignissen in der Vergangenheit (z.B. Sr/Ca) abgeleitet werden (McCulloch et al., 1994).

Neuere Forschungsergebnisse deuten darauf hin, daß die Sr/Ca- (Beck et al., 1992, Gagan et al., 1998), Mg/Ca- (Mitsuguchi et al., 1996) und U/Ca-Verhältnisse (Min et al., 1995) in gebänderten Korallen als Proxies für Paläotemperaturen angesehen werden können. Die grundlegende Idee dabei ist, die saisonal variierenden Sr/Ca-, Mg/Ca- und U/Ca-Verhältnisse in heute lebenden gebänderten Korallen gegen bekannte Zeitreihen der Temperatur zu eichen. Mittels Thermionen-Massenspektrometrie (TIMS) gemessene Sr/Ca-Verhältnisse können mit einer statistischen Präzision von 0.1 bis 0.02% ( $2\sigma$ ) bestimmt werden. Hinsichtlich der Temperatur entspricht dies einer Unsicherheit von maximal 0.05 bis 0.25°C ( $2\sigma$ , Beck et al., 1992). Bei den holozänen bzw. Eem-zeitlichen Korallen können dann die Paläotemperaturen mittels dieser Eichgeraden bestimmt werden. Die grundlegende Voraussetzung bei dieser Vorgehensweise ist jedoch, daß die Element-Verhältnisse tatsächlich unabhängig von anderen Parametern wie z.B. Wachstumsratenänderungen der Koralle sind und das die Elementverhältnisse des Meerwassers zeitlich konstant sind. Desweiteren dürfen die Korallen postmortal keine chemisch-diagenetischen Veränderungen erfahren haben.

Shen & Dunbar (1995) und Min et al. (1995) benutzen erstmals U/Ca-Verhältnisse in Korallen als Proxis für die SST. Im Vergleich mit Sr/Ca- zeigen U/Ca-Verhältnisse gegenüber Temperaturänderungen eine ca. 5-fach höhere Amplitude. Einen weiteren Vorteil sehen Shen & Dunbar (1995) im Nachweis von unalteredem fossilen Korallen-Aragonit für U/Th-Datierungen, da das Auftreten jährlicher U/Ca-Zyklen ein generelles Merkmal primären Korallen-Aragonits ist.

Mitsuguchi et al. (1996) sehen Mg/Ca-Verhältnisse als potentiellen SST-Proxy an. Aufgrund der gegenüber Sr/Ca-Verhältnissen ca. 4-fach höheren Amplituden gelingt es ihnen, mittels ICP-AES einen relativ geringen Fehler von  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  in Bezug zur SST zu erreichen.

Das Ziel der hier vorliegenden Arbeit ist, die Zuverlässigkeit des Sr/Ca- und U/Ca-Thermometers zu testen. Zu diesem Zweck werden mittels TIMS Sr/Ca- und U/Ca-Verhältnisse an rezenten Korallen der Gattung *Porites lutea* aus dem Ost- und West-Indik untersucht. Anhand einer 5.2 und 117 ka alten Koralle (*Porites lutea*) werden Paläotemperaturen am Ningaloo Reef an der westaustralischen Küste bestimmt.

## 2 Elementkonzentrationen in Korallen und Meerwasser

Der Transfer von im Meerwasser gelösten Elementen in die aragonitische Skelettstruktur gebänderter Korallen wird durch einen Verteilungskoeffizienten  $K_D$  beschrieben, welcher die Häufigkeit eines bestimmten Elementes relativ zum Meerwasser angibt:

$$K_D = \frac{([Me]/[Ca])_{\text{Koralle}}}{([Me]/[Ca])_{\text{Meerwasser}}} \quad (1)$$

So ist z.B. der  $K_D$  von Sr:

$$K_D(\text{Sr}) = \frac{\text{Sr}_{\text{Koralle}} \cdot \text{Ca}_{\text{SMOW}}}{\text{Ca}_{\text{Koralle}} \cdot \text{Sr}_{\text{SMOW}}} \quad (2)$$

Der Verteilungskoeffizient chemischer Elemente hängt bei konstanten äußeren Bedingungen von einer Reihe von Faktoren wie z.B. Ionenradius, Koordinationszahl, Ladungsgleichgewicht und chemischen Eigenschaften ab. Zweiwertige Elemente mit großen effektiven Ionenradien wie z.B. Sr, Ra, Ba, Nd, Sm, Co, Cd und Zn werden aufgrund ähnlicher Ionenradien zu  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen bevorzugt im Kalzit-/Aragonit-Gitter substituiert, weshalb für diese Elemente  $K_D$ -Werte erwartet werden, die um 1 und höher liegen. So konnte z.B. für Pb ein  $K_D$  von 2.3 bestimmt werden. Durch experimentelle Bestimmungen ermittelte  $K_D$ -Werte weichen von den theoretischen, aus den Löslichkeitsprodukten ermittelten  $K_D$ -Werten ab. Der Grund hierfür ist, daß experimentelle Bedingungen sich dem Gleichgewichtszustand lediglich annähern können. So kann z.B. an der Grenzschicht zwischen Lösung und Kristall eine Anreicherung oder Verarmung von Spurenelementen in Abhängigkeit vom  $K_D$ -Wert und der Ionen-Transportrate von der Lösung zur Mineraloberfläche erfolgen (Usdowski, 1975, Rimstidt et al., 1998). Der  $K_D$ -Wert ist weiterhin von der Konzentration des Spurenelements und der Konzentration zusätzlicher Komponenten abhängig.

Eine wichtige Variable, welche den  $K_D$  mit kontrolliert, ist die Temperatur. Aus der Kenntnis dieses Zusammenhanges ist es dann möglich, den marinen Chemismus und die Wassertemperaturen der jüngsten Vergangenheit aus rezenten gebänderten Korallen zu rekonstruieren.

So werden Metall/Ca-Verhältnisse zur Rekonstruktion der Konzentrationsänderungen im Meerwasser verwendet (Shen & Boyle, 1988), die mit Änderungen regionaler Zirkulationsmuster oder mit natürlichen oder anthropogen verursachten zeitlichen Konzentrationsänderungen in Zusammenhang gebracht werden. Für die Rekonstruktion von SST's in gebänderten Korallen wurden bisher Sr/Ca-Verhältnisse verwendet (z.B. Beck et al., 1992, McCulloch et al., 1994, Gagan et al., 1998). Min et al. (1995) sehen in U/Ca-Verhältnissen ein Potential zur SST-Rekonstruktion. Ein Vorteil gegenüber Sr/Ca ist die höhere Empfindlichkeit von U/Ca



gegenüber Temperaturschwankungen, was sich in einem höheren Amplitudenhub widerspiegelt.

Neben der SST werden in diesem Kapitel weitere Einflußgrößen beschrieben, die auf die Sr/Ca- und U/Ca-Verhältnisse einwirken können und bei der Anwendung dieser Elementverhältnisse als Klima-Proxy beachtet werden müssen.

## 2.1 Verweilzeiten von Sr, Ca und U im Meerwasser

Das Ausmaß, mit dem die Konzentration eines Elements im Meerwasser unabhängig von der Salinität schwankt, hängt zum einen von den lokalen Prozessen, die das Element zuführen oder wieder aus dem Meerwasser entziehen, ab. Zum anderen ist die Konzentrationschwankung, oder die Abweichung vom konservativen Verhalten des Elements, von der Geschwindigkeit der Durchmischung des Ozeans abhängig, die diese lokalen Unterschiede ausgleicht. Es dauert ca. 1000 Jahre, um das Tiefenwasser (unter 1000 m) der Ozeane durch an Strömungskanälen absinkendes Oberflächenwasser einmal auszutauschen (Broecker & Peng, 1982). Solche Strömungskanäle sind im Weddell-Meer, Nordatlantik nahe Island sowie in der Labradorsee und Grönlandsee gefunden worden (Lanius, 1995). Ein paar solcher Austauschzyklen reichen aus, um die Ozeane gut zu durchmischen und somit Konzentrationsunterschiede zwischen Zu- und Abflußgebieten auszugleichen (Pilson, 1998).

Ein Maß für die Abweichung eines Elements vom konservativen Verhalten ist die Verweilzeit  $\tau$ . Sie ist die Zeit, die benötigt wird, um die gesamte Menge eines bestimmten im Meerwasser gelösten Elements einmal auszutauschen:

$$\tau = \frac{\text{Masse des gelösten Elements im Meerwasser}}{\text{jährliche Zuflußrate}} \quad (3)$$

Dabei wird angenommen, daß die Ozeane sich in einem chemischen Langzeit-Gleichgewicht befinden, d.h. die Menge der in das Meerwasser zugeführten gelösten Bestandteile gleich die der aus dem Meerwasser abgeführten ist.

Die Hauptzuflüsse für Ca und Sr stellen die Flußzuläufe, der Sediment-Wasser-Austausch und der Austausch am mittelozeanischen Rücken (hydrothermaler Fluß) dar (Pilson, 1998, Palmer & Elderfield, 1985). Für U kann die ungefähre jährliche Zuflußrate aus den Flußzuläufen ermittelt werden (Cochran, 1992). Beispiele für die Berechnung der Verweilzeiten von Ca, Sr und U sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Verweilzeiten stellen eine ungefähre Abschätzung dar. Andere Modellrechnungen ergeben z.B. Verweilzeiten für Ca, Sr und U von ca.  $1.1 \cdot 10^6$ ,  $5.1 \cdot 10^6$  (Broecker & Peng, 1982) und  $3.0\text{-}4.5 \cdot 10^5$  Jahren (Ku et al., 1977, Cochran, 1992).

Die für die Berechnung der Verweilzeit verwendeten Daten sind mit z.T. größeren Unsicherheiten verbunden. So bemerken Chen et al. (1986) einen Widerspruch zwischen der

relativ hohen Verweilzeit von U und der gefundenen Spanne der U-Meerwasserkonzentration im Pazifik von 3.8%. Sie stellen fest, daß diese Konzentrations-Spanne eine Größenordnung höher ist, als durch ein Modell aus U-Zufluß und Durchmischungsgeschwindigkeit im Ozean berechnet. Als mögliche Ursache werden Analysenfehler in der U-Konzentrationsbestimmung aufgrund U-Adsorption an die Probenbehälterwandungen in Betracht gezogen. Palmer & Edmond (1989) berechnen hinsichtlich der Unsicherheiten in ihrem Modell einen hydrothermalen Wasserfluß von  $0.9$  bis  $1.5 \cdot 10^{14}$  kg/a, was einem Sr- Fluß von  $1.3$  bis  $18.9 \cdot 10^9$  mol/a entspricht. Hodell et al. (1990) stellen mit Hilfe von planktonischen Foraminiferen in Sedimentkernen einen Anstieg des  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  während der vergangenen 8 Mio. Jahre fest. Zur Berechnung der Verweilzeit verwenden sie deshalb ein Ungleichgewichtsmodell.

**Tabelle 1** Gelöste Gesamtmenge in den Ozeanen, jährliche Zuflußraten und daraus berechnete Verweilzeiten für Ca, Sr und U.

	Ca	Sr	U
Konzentration im Meerwasser [mmol/l]	10.53	0.0928	$1.42 \cdot 10^{-5}$
Masse des gelösten Elements im Meerwasser [mol]	$14.2 \cdot 10^{18}$	$12.5 \cdot 10^{16}$	$19.2 \cdot 10^{12}$
<u>jährliche Zuflüsse</u>			
Flußzulauf [mol/a]	$12.5 \cdot 10^{12}$	$33.3 \cdot 10^9$	$4.2 \cdot 10^7$
Sediment-Wasser Austausch [mol/a]	$5.0 \cdot 10^{12}$	$3.4 \cdot 10^9$	
Austausch am mittelozeanischen Rücken [mol/a]	$3.3 \cdot 10^{12}$	$14.4 \cdot 10^9$	
jährliche Zuflußrate [mol/a]	$20.8 \cdot 10^{12}$	$51.1 \cdot 10^9$	$4.2 \cdot 10^7$
Verweilzeit [a]	$0.68 \cdot 10^6$	$2.4 \cdot 10^6$	$0.46 \cdot 10^6$

**Anmerkungen:** Die Daten für Ca stammen aus Pilson (1998), für Sr aus Palmer & Edmond (1989). Für den Sr-Zufluß aus dem mittelozeanischen Rücken wurde der Wert von Hodell et al. (1990) verwendet. Die Daten für U stammen aus Cochran (1992). Als Wasservolumen der Ozeane wurde  $1.35 \cdot 10^9$  km<sup>3</sup> eingesetzt (Menard & Smith, 1966). Zur Berechnung der molaren Meerwasserkonzentrationen [mmol/l] wurde die Dichte von Meerwasser (1.024763 kg/l) bei  $t = 20^\circ\text{C}$  verwendet.

Ca und Sr weisen vertikale Konzentrationsgradienten im Oberflächenwasser auf. Untersuchungen von de Villiers et al. (1994) zeigen im Vergleich mit Phosphat ein deutliches Nährstoff-typisches Verhalten von Sr/Ca mit ab 1000 m abnehmenden Verhältnissen. Sr und Ca (normiert auf Meerwasser-Salinität) sind an der Oberfläche des zentralen Nordpazifiks im Verhältnis zu 4000 m Tiefe um 1.95% bzw. 0.32% abgereichert. Sr zeigt eine drastische Konzentrationszunahme mit der Tiefe in den oberen 1000 m. Aufgrund der deutlichen Abnahme der Ca-Konzentration im Bereich von 400 bis 600 m wird  $\text{CaCO}_3$ -Auflösung als Quelle ausgeschlossen. Als Prozeß für die starke Sr-Zunahme in den oberen 1000 m wird von de Villiers et al. (1994) hauptsächlich die Auflösung von Acantharia-Skeletten gesehen. Acantharien sind marine planktonische Protozoen, die als einzige marine Lebewesen Sr als Hauptkomponente ihres Skeletts benutzen. Das Skelett besteht aus Coelestin ( $\text{SrSO}_4$ ), das sich im Pazifik beim Herabsinken innerhalb der oberen 1000 m auflöst (Beers & Stewart, 1970,

Bernstein et al., 1987, Michaels, 1988). Als Ursache für die stetige Zunahme der Sr- und Ca-Konzentration unterhalb 1000 m wird die Auflösung absinkender kalzitischer Organismen gesehen.

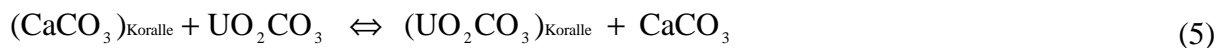
Um den Einfluß dieses nicht konservativen Verhaltens von Sr und Ca in der Wassersäule im Hinblick auf die Sr/Ca-Verhältnisse im Korallen-Aragonit zu beurteilen, untersuchen de Villiers et al. (1994) 90 Meter Wassersäule in der Nähe ihrer Probenlokation Galapagos-Inseln. Die Wasserproben wurden während der "upwelling"-Phase genommen, in der eine flache Thermokline und nährstoffreiches Oberflächenwasser vorherrschen. Trotzdem bleiben die Sr/Ca-Verhältnisse relativ konstant. Die Abweichungen vom Mittelwert liegen innerhalb 0.27% ( $1\sigma$ ), was bei der dort verwendeten Sr/Ca-SST-Beziehung im Korallen-Aragonit einem Temperaturäquivalent von ca.  $0.36^\circ\text{C}$  entspricht. Probenlokationen, die nicht an "upwelling"-Gebieten liegen, weisen wahrscheinlich noch geringere Sr/Ca-Schwankungen in der Wassersäule auf.

## 2.2 Komplexbildung von U

Da die U-Konzentration in kalzitischen Foraminiferen mit 0.02-0.05 ppm ca. 50-150-fach niedriger als in aragonitischen Korallen ist, vermuten Shen & Dunbar (1995), daß U im orthorhombischen Gitter des Aragonits kompatibler als im rhomboedrischen Gitter des Kalzites ist. U sollte demnach als große Komplexion in Karbonate aufgenommen werden. Bei einer Aufnahme als  $\text{U}^{4+}$  oder  $\text{U}^{6+}$  würde aufgrund ähnlicher Ionenradien zu  $\text{Ca}^{2+}$  der  $K_D$ -Wert von Kalzit näher an dem des Aragonits liegen. Aufgrund von Modellrechnungen nach Millero et al. (1993) sehen Shen & Dunbar (1995) die von Swart & Hubbard (1982) favorisierte Substitution von Karbonat- gegen Uranylkarbonatgruppen als den wahrscheinlichsten Mechanismus bei der Skelettbildung an:



Ein weiterer, denkbarer Mechanismus wäre die Substitution ganzer Kalziumkarbonatgruppen durch Uranylkarbonatgruppen (Shen & Dunbar, 1995):



oder die Substitution von Kalzium gegen eine Uranylgruppe (Christ et al., 1955):



U liegt im Meerwasser vorwiegend in Form von Uranylkarbonat-Komplexen vor. Bei einem Meerwasser-pH-Wert von 8 existieren ca. 90% des U in dieser Form, die verbleibenden 10%

als  $\text{UO}_2(\text{OH})_3^-$  (Djogic et al., 1988). Um U in Form von  $\text{UO}_2\text{CO}_3$  in das Korallenskelett einzubauen wird von Shen & Dunbar (1995) ein biologischer Einfluß durch die Epithelen, z.B. reduzierende Bedingungen, vermutet. Min et al. (1995) nehmen an, daß Korallen ein chemisches Mikromilieu erzeugen, in dem gelöste Karbonat-Spezies neben von der Umgebung abhängigen Temperaturänderungen auch von anderen Größen, wie dem pH-Wert und dem  $\Sigma\text{CO}_2$  des Mikromilieus, kontrolliert werden. Diese Änderungen wirken sich auch auf die gelösten Uranyl- und Uranylkarbonat-Spezies aus und verändern das U/Ca-Verhältnis im ausgefallten Aragonit. Darüber hinaus kann die Meerwasserkonzentration gelöster Karbonat-Ionen in Abhängigkeit von "upwelling"-Prozessen (z.B. höherer  $\Sigma\text{CO}_2$  und pH-Wert) schwanken. Ausgehend von dem in Millero et al. (1993) aufgestellten Modell zeigen Shen & Dunbar (1995), daß eine Änderung der  $\text{CO}_3^{2-}$ -Konzentration von 10 auf 14  $\mu\text{M}$  (6%) eine Änderung des U/Ca-Verhältnisses der Koralle um 15% hervorrufen könnte.

### 2.3 Biologische und chemische Alteration

Das Korallenskelett kann z.T. sehr stark von Endolithen, vorrangig Algen und Pilzen, bewachsen sein. Ein Hinweis darauf sind graue bis schwarze Bänder im Korallenskelett. Die Endolithen bzw. die von ihnen ausgeschiedenen Substanzen können frühzeitige sekundäre Aragonitausscheidungen an den Pilz- und Algenfäden selbst sowie den Wandungen des Porenraums hervorrufen (Scherer, 1974, Kobluk & Risk, 1977). Die Elementverhältnisse des primär ausgeschiedenen Korallen-Aragonits können somit verändert werden.

Durch Dünnschliff-, rasterelektronenmikroskopische und pulverdiffraktometrische Untersuchungen kann diese Fehlerquelle untersucht und vermieden werden (Abb. 1., Abb. 2).

### 2.4 Umwelteinflüsse

Korallen sind in ihrem Lebensraum verschiedensten Umwelteinflüssen ausgesetzt. Dabei stellt die SST wahrscheinlich die Haupteinflußgröße für Änderungen des Sr/Ca-Verhältnisses dar. Dafür sprechen neben experimentellen Ergebnissen (Kinsman & Holland, 1969) aus Sr/Ca-Verhältnissen gewonnene SST-Rekonstruktionen und deren Vergleich mit instrumentell gemessenen SST's (z.B. Beck et al., 1992, McCulloch et al., 1994, Gagan et al., 1998). Diskutiert werden jedoch auch Wachstumseinflüsse auf das Elementverhältnis. Das Wachstum von Korallen wird neben der SST u.a. von der Lichtintensität, Salinität und dem Nährstoffreichtum beeinflusst. Über das Ausmaß der wachstumsbedingten Beeinflussung des Sr/Ca- und U/Ca-Verhältnisses in Korallen liegen z.T. widersprüchliche Ergebnisse vor:

So stehen die Beobachtungen von de Villiers et al. (1995), die in *Pavona clavus* durch Wachstumsraten zwischen 6 und 14 mm/a hervorgerufene Sr/Ca-SST-Unterschiede von 2°C bis 4°C feststellen im Widerspruch zu Shen et al. (1996), die bei Untersuchungen zweier

*Porites*-Kerne (*Porites lutea* und *Porites lobata*) keine Anzeichen für den Einfluß der Wachstumsrate auf das Sr/Ca-Verhältnis nachweisen können. Die in der Arbeit von Gagan et al. (1998) dargestellten 3 Sr/Ca-Regressionsgeraden von *Porites lutea* stimmen ebenfalls innerhalb der statistischen Unsicherheit sehr gut überein, obwohl die Korallen von 3 unterschiedlichen Lokalitäten stammen und Wachstumsraten bzw. Aragonit-Ausfällungsraten, Salinität, "upwelling" sowie Trübung der Wassersäule teilweise sehr große Unterschiede aufweisen.

Hinsichtlich des U/Ca-Verhältnisses in Korallen kann Swart (1980) keine Hinweise auf signifikante Wachstumseinflüsse finden. Relativ zu den großen durch Temperatur- und möglicherweise Salinitäts-Einflüssen hervorgerufenen U/Ca-Variationen finden Shen & Dunbar (1995) nur wenige Anzeichen für einen systematischen Wachstumsraten-Einfluß.

## 2.5 Gattungs- und Art-Unterschiede

Da die Bildung des Korallenskelettes durch die Korallen-Polypen erfolgt, ist ein biologischer Einfluß auf das Elementverhältnis im Aragonit denkbar. Zwischen in derselben Umgebung wachsenden unterschiedlichen Korallen-Arten, *Porites lutea* und *Porites lobata*, können Shen et al. (1996) keine signifikanten Unterschiede zwischen den durch SST-Änderungen hervorgerufenen Sr/Ca-Änderungen im Korallen-Skelett feststellen. De Villiers et al. (1994) finden zwischen unterschiedlichen Gattungen (*Porites lobata*, *Pavona clavus*, *Pocillopora eydouxi*) signifikante Unterschiede in der Empfindlichkeit der Sr/Ca-Aufnahme bei SST-Änderungen, sowie generell niedrigere oder höhere Sr/Ca-Verhältnisse für eine definierte SST.

Diese Art- bzw. Gattungsspezifischen Unterschiede werden aus den für jede Koralle aufgestellten linearen Regressionsgeraden, welche die jeweilige Sr/Ca-SST-Beziehung widerspiegeln, abgeleitet. Die Interpretation sollte jedoch mit Vorsicht erfolgen, da auch andere Faktoren, so auch der zuvor beschriebene Wachstumseinfluß die Steigung und den Achsenabschnitt beeinflussen können. Die in der vorliegenden Arbeit untersuchten 5 rezenten und 2 fossilen Korallen gehören zur Art *Porites lutea*. Dadurch können durch Speziesunterschiede hervorgerufene Variationen der Sr/Ca- bzw. U/Ca-SST-Beziehung ausgeschlossen werden.

### 3 Probenahme und Methodik

#### 3.1 Probenahme

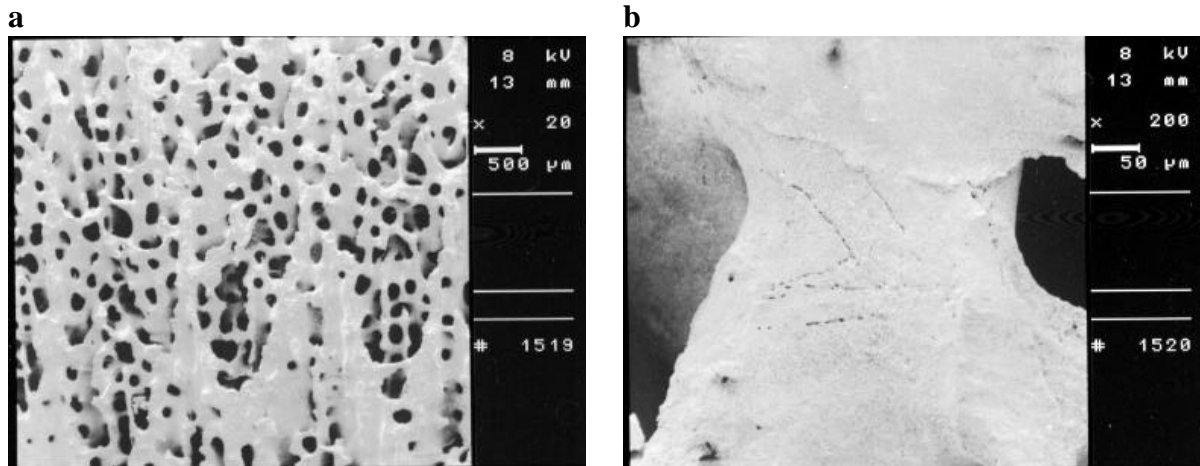
Die Probenahme und die Aufbereitung der Einzelproben erfolgte in den Untersuchungsgebieten West- und Ost-Indik durch verschiedene Arbeitsgruppen. Die folgende Beschreibung bezieht sich auf die Probenahme im West-Indik.

Alle Kerne wurden vom höchsten Punkt der Korallen-Körper, parallel zur Wachstumsrichtung (lotrecht zur Korallenoberfläche) gebohrt. Verwendet wurde ein pneumatischer Kernbohrer mit einem Diamant-bestückten 5 mm starken Stahlkernrohr von 300 mm Länge und 36 mm Innenrohrdurchmesser (detaillierte Beschreibung in Heiss et al., 1993, Heiss, 1994). Die Bohrlöcher wurden mit Zement-Stopfen gefüllt, um Bioerosion zu verhindern (siehe Hudson et al., 1976, Winter et al. 1991). Die Korallen-Kerne wurden mittels Diamant-Steinsäge in ca. 3 bis 5 mm starke Scheiben zerteilt. Die Scheiben wurden dann 48 h in 10%-igem  $H_2O_2$  gereinigt, um organisches Material zu entfernen. Anschließend wurden die Scheiben mit demineralisiertem Wasser gereinigt, mit Preßluft abgeblasen und dann 24 h im Trockenschrank bei 40°C getrocknet. Um die jährliche Dichtebänderung sichtbar zu machen (Knutson et al., 1972, Hudson et al., 1976), wurden die Scheiben mit einem Seifert-Industrie-Röntgengerät (Typ ERESKO 120 kV/5 mA) bei 35 kV und 5 mA geröntgt. Dabei wurden ein AGFA GEVAERT STRUCTURIX D4-Film verwendet sowie Positiv-Abzüge hergestellt. An den Positiv-Abzügen wurden die ca. jährlichen Zuwachsraten entlang der Hauptwachstumsachse (vertikal) gemessen (Buddemeier et al., 1974, Logan & Tomascik, 1991). Bestimmt wurden die Zuwachsraten als der Abschnitt zwischen den oberen Enden der "low-density"-Bänder (LD). Die LD stellen die am deutlichsten unterscheidbare Grenze in den Proben dar. Die Wachstumsrate wurde um den Winkel zwischen der gesägten Scheibe und der Wachstumsrichtung korrigiert.

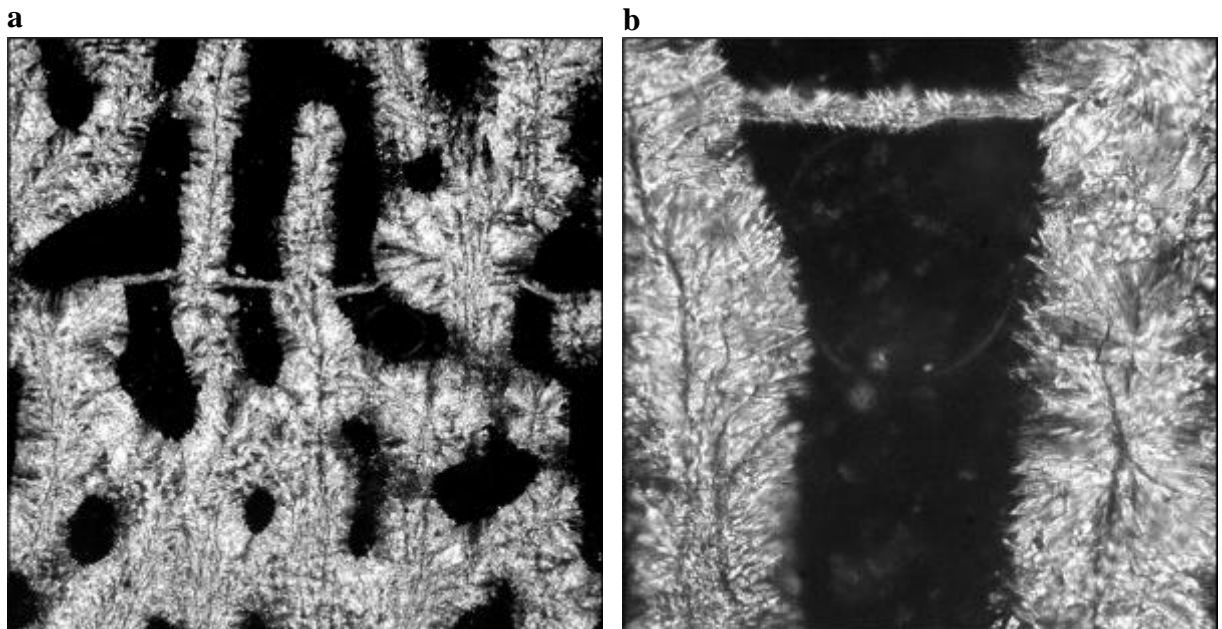
Die Proben wurden mittels eines PC-gesteuerten Zahnarztbohrers mit 1000 U/min entlang der maximalen Wachstumsachse erbohrt. Dabei ist die Korallen-Scheibe auf einen beweglichen Tisch befestigt. Der Abstand zwischen den einzelnen Bohrungen beträgt 1 mm, die Bohrtiefe 3 mm und der Bohrdurchmesser 0.5 mm. Mit dieser Beprobung wird eine annähernd monatliche zeitliche Auflösung erreicht. Das herausgebohrte Probenmaterial wird in einem Becher aufgefangen. Nach jedem Bohrschritt wurde die Korallenscheibe und der Bohrer mit einem weichen Pinsel und Druck-Stickstoff gereinigt, um Querkontaminationen zu vermeiden. Nach dem Bohren wurde die Korallen-Scheibe erneut geröntgt, um die einzelnen Probenpositionen und Abstände zu überprüfen.

Die Probenahme im Ostindik geschah ähnlich. Zur Einzelprobengewinnung kam hier ein Zahnarztbohrer mit 1 mm Durchmesser zum Einsatz. Der Probenabstand betrug 2 mm, in einigen Abschnitten 1 mm. Im Mittel wurde ca. zweimonatige Auflösung pro Jahrgang erreicht.

An einigen Bereichen des Ningaloo- und Abrolhos-Kerns wurden rasterelektronenmikroskopische (Abb. 1) und pulverdiffraktometrische Untersuchungen durchgeführt sowie Dünnschliffe (Abb. 2) angefertigt, um diagenetische Veränderungen in den untersuchten Bereichen auszuschließen. Bis auf unverfüllte Algenbohrgänge wies lediglich die Basis des Ningaloo-Kerns eine intensive Zementation mit epitaxialem, nadeligem Aragonit auf (Abb. 2).



**Abb. 1** REM-Aufnahmen vom Abrolhos-Kern. Ein Maßstab ist jeweils rechts oben eingeblendet. Aufnahme (a) zeigt das Korallenskelett parallel zur Wachstumsrichtung. Die porösen Wände (daher *Porites*!) der einzelnen Korallite sind deutlich zu erkennen. Aufnahme (b) zeigt bei noch stärkerer Vergrößerung die Wand zwischen zwei Poren. Die dunklen, löchrigen Linien und Kerben auf der Wand sind Mikrobohrungen von Algen oder Pilzen, die das Skelett der Koralle noch zu ihren Lebzeiten besiedelt haben. Die Aufnahmen wurden von H. Kuhnert, Univ. Bremen angefertigt.



**Abb. 2** Dünnschliffaufnahmen der Basis des Ningaloo-Kerns. Das Korallenskelett weist eine intensive Zementation mit epitaxialem, nadeligem Aragonit auf (Bildbreite (a) ca. 1 mm, (b) ca. 0.2 mm). Der Dünnschliff wurde von H. Kuhnert, Univ. Bremen angefertigt.

### 3.2 Chemische Aufbereitung

Für die Sr-, Ca- und U-Analytik werden 20 bis 80 µg Probenmaterial in verschraubbaren PFA-Gefäßen mit 0.5 ml 2N HNO<sub>3</sub> in Lösung gebracht. Zu der Lösung wird ein <sup>42</sup>Ca-<sup>84</sup>Sr-<sup>233</sup>U-<sup>236</sup>U-Spike so zugegeben, daß sich ein <sup>42</sup>Ca/<sup>44</sup>Ca-Verhältnis von ca. 2.5, ein <sup>84</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr-Verhältnis von ca. 0.3 und ein <sup>236</sup>U/<sup>238</sup>U-Verhältnis von ca. 0.1 ergibt. Die Lösung wird unter Reinstluftbedingungen bis zur völligen Trockne eingedampft und der Rückstand mit 0.1 N HNO<sub>3</sub> aufgenommen. Die Konzentration der Lösung beträgt ca. 4500 µg/g Ca bzw. 90 µg/g Sr und 0.04 µg/g U. Etwa 20 µg Ca bzw. 400 ng Sr und 0.17 ng U werden auf ein Rhenium-Filament aufgetragen.

Die Meerwasserproben wurden mittels Membranfilter (MFS/Advantec, 0.45 µm) gefiltert. Für die Sr/Ca-Separation wurde 1 ml eines gespicktes Aliquots auf Ionenaustauscher-Säulen (Biorad AG-50W-X8, 200-400 mesh, hydrogen form) gegeben, um K und andere Elemente zu entfernen. Für die U-Separation wurden 0.5 ml des Aliquots auf Ionenaustauscher-Säulen gegeben. Nach dem Eindampfen der Proben und Aufnehmen der Rückstände mit 0.1 N HNO<sub>3</sub> werden etwa 20 µg Ca bzw. 370 ng Sr auf ein, und 5 ng U auf ein weiteres Rhenium-Filament aufgetragen.

### 3.3 Isotopenmessungen

Die Isotopenmessungen werden an einem Feststoff-Massenspektrometer Finnigan MAT 262 RPQ<sup>+</sup> durchgeführt. Dabei wird die Rhenium Doppelfilament-Methode angewendet. Die Intensitäten der Massen <sup>42</sup>Ca, <sup>44</sup>Ca werden simultan im "static mode" gemessen. Anschließend wird im "peak jump"-Modus die Intensität von Masse <sup>40</sup>Ca bestimmt. Die Masse <sup>40</sup>Ca wird auf dem "cup" gemessen, auf dem zuvor <sup>44</sup>Ca bestimmt wurde. Die simultane Messung aller drei Isotope ist zwar möglich, erfordert jedoch bei jeder Umstellung des Massenspektrometers auf die Ca-Isotopenmessung umfangreichere Parameteränderungen. Am Ionisationsfilament wird ein Heizstrom zwischen 2.3 A und 2.9 A und für das Evaporationsfilament zwischen 0.7 A und 1.0 A eingestellt. Dies entspricht einer Temperatur von ca. 1370 bis 1480°C und einer <sup>40</sup>Ca-Intensität von 4-6 V. Während des Aufheizens wird der Ionenstrahl mehrmals nachfokussiert. Die Messung wird bei einer <sup>39</sup>K-Intensität von unter  $1 \cdot 10^{-2}$  V begonnen. Die <sup>40</sup>Ca-Intensität ist dabei unter  $0.1 \cdot 10^{-3}$  ‰ durch <sup>40</sup>K erhöht. Zudem wird der Isobareneffekt von <sup>40</sup>K auf <sup>40</sup>Ca korrigiert, indem <sup>41</sup>K simultan mit <sup>40</sup>Ca gemessen wird. Der Isobareneinfluß ist somit absolut vernachlässigbar.

Gemessen werden 5 Blöcke mit jeweils 15 "Scans" (75 Einzeldaten). Die Integrationszeit beträgt 16 s pro "Scan". Zur Korrektur der während der Messung auftretenden Massenfraktionierung wird auf das <sup>40</sup>Ca/<sup>44</sup>Ca-Verhältnis des ersten Blocks mit Hilfe der Rayleigh-Gleichung normiert. Alle Daten sind nach dem 2-Sigma-Kriterium Ausreißer-korrigiert (DIXON-Test). Für die Korrektur der gesamten, einschließlich vor Beginn der eigentlichen



Messung auftretenden Massenfraktionierung wird das mittlere  $^{40}\text{Ca}/^{44}\text{Ca}$ - bzw.  $^{42}\text{Ca}/^{44}\text{Ca}$ -Verhältnis auf sein natürliches Verhältnis von 46.472 bzw. 0.31016 (de Bièvre & Taylor, 1993) normiert. Der interne Fehler ( $2\sigma$ -Vertrauensintervall bei  $p = 95\%$ ) der Ca-Gesamtkonzentration liegt im Durchschnitt bei 0.008%.

Nach den Ca-Messungen wird das Massenspektrometer auf Strontium umgestellt. Zunächst wird der Filamentstrom der jeweiligen Ca-Messung eingestellt und der Strahl fokussiert. In der Regel genügt eine Erhöhung des Stromes am Ionisations- bzw. Evaporationsfilament um ca. 70 mA, um eine  $^{88}\text{Sr}$ -Intensität von 4-6 V zu erreichen. Die Temperatur steigt dabei um ca.  $40^\circ\text{C}$ . Die Messung der Isotope  $^{84}\text{Sr}$ ,  $^{86}\text{Sr}$ ,  $^{87}\text{Sr}$  und  $^{88}\text{Sr}$  erfolgt simultan. Die Datenaufbereitung geschieht wie für Kalzium beschrieben. Dabei wird auf das natürliche  $^{84}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - und  $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}$ -Verhältnis von 0.05680 bzw. 0.11940 (de Bièvre & Taylor, 1993) normiert. Der interne Fehler der Sr-Gesamtkonzentration liegt im Durchschnitt bei 0.004%. Der interne Fehler des Sr/Ca-Verhältnisses liegt durchschnittlich bei 0.009%.

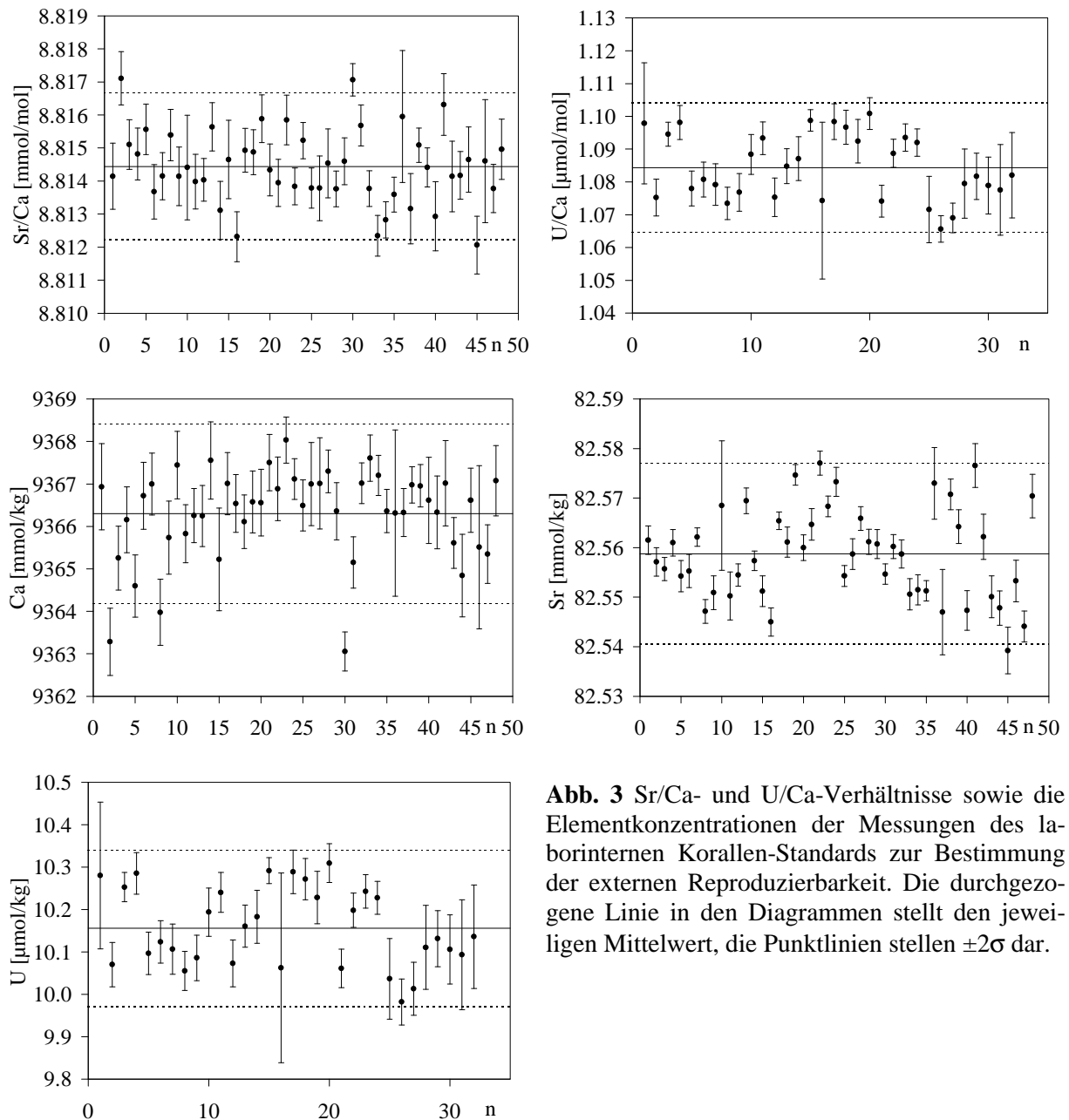
Die U-Messungen wurden unter Verwendung eines SEM (secondary electron multiplier) im "peak jump"-Modus in der Reihenfolge  $^{238}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}$  und  $^{233}\text{U}$  durchgeführt. Das Ionisationsfilament wird mit ca. 4.9-5.3 A, das Evaporationsfilament mit 1.3-1.9 A geheizt. Die Filamenttemperatur liegt zwischen  $1920$  und  $1990^\circ\text{C}$ . Die  $^{238}\text{U}$ -Intensität beträgt ca.  $10 \cdot 10^3$  "counts". Massenfraktionierungseffekte liegen durchschnittlich bei ca. 3% und werden durch das  $^{233}\text{U}/^{236}\text{U}$  Isotopenverhältnis des Spikes von 0.9681 korrigiert. Der interne Fehler des U/Ca-Verhältnisses liegt gewöhnlich bei 0.5%.

Die Blindwerte für die Korallenanalytik sind vernachlässigbar. Sie betragen 0.2 ng für Ca, 0.6 pg für Sr und 0.02 pg für U. Die Blindwerte für die Wasseranalytik betragen 50 pg Ca, 3 ng Sr und 0.5 pg U und werden im Ergebnis berücksichtigt.

Zum Test der externen Langzeit-Reproduzierbarkeit der Ca-, Sr- und U-Gesamtkonzentrationen sowie der Konzentrationsverhältnisse über die gesamte Meßperiode wurde eine laborinterne Standardlösung angefertigt. 48 Sr/Ca- und 32 U/Ca-Verhältnisse dieser Lösung wurden gemessen (Abb. 3). Der Mittelwert aus diesen Messungen beträgt für das Sr/Ca-Verhältnis 8.814 mmol/mol mit einer  $2\sigma$ -Standardabweichung von 0.025%. Das Verhältnis für die U/Ca-Verhältnisse beträgt  $1.08 \mu\text{mol/mol}$  mit einer  $2\sigma$ -Standardabweichung von 1.8% (Tabelle 2). Auf die Temperatur bezogen entspricht dies einem Analysenfehler von  $0.03^\circ\text{C}$  für Sr/Ca und  $0.5^\circ\text{C}$  für U/Ca (bei Verwendung von Geradengleichung 22 bzw. 29).

**Tabelle 2** Mittelwerte und Standardabweichung ( $2\sigma$ ) der Korallen-Standardmessungen

	n	Mittelwert	$2\sigma$	$2\sigma$ [%]
Sr/Ca	48	8.814 mmol/mol	0.0022	0.025
U/Ca	32	$1.08 \mu\text{mol/mol}$	0.020	1.8
Ca	48	9366 mmol/kg	2.1	0.023
Sr	48	82.56 mmol/kg	0.018	0.022
U	32	$10.2 \mu\text{mol/kg}$	0.18	1.8



**Abb. 3** Sr/Ca- und U/Ca-Verhältnisse sowie die Elementkonzentrationen der Messungen des laborinternen Korallen-Standards zur Bestimmung der externen Reproduzierbarkeit. Die durchgezogene Linie in den Diagrammen stellt den jeweiligen Mittelwert, die Punktlinien stellen  $\pm 2\sigma$  dar.

### 3.4 Anorganische Ausfällung von Aragonit

In Zusammenarbeit mit M. Dietzel aus dem Mineralogischen Institut der Univ. Göttingen wurde Aragonit aus sulfatfreier Lösung in Abhängigkeit der Temperatur ausgefällt. Aus jeweils 5 l Lösung mit einer  $\text{CaCl}_2$ -Konzentration von 0.01 mol/l und einer  $\text{MgCl}_2$ -Konzentration von 0.02 mol/l wurde bei 20, 30 und 40°C durch variable Zugabe von  $\text{SrCl}_2$  Aragonit ausgefällt. Nähere Einzelheiten zur Methode sind in Dietzel & Usdowski (1996) beschrieben. Aufgrund des großen Volumens der Lösungen und der geringen Mengen von ausgefällttem Aragonit kann eine Konzentrationsänderung der Lösung vernachlässigt werden. Das Verhältnis ( $m_{\text{Sr}^{2+}}^A / m_{\text{Ca}^{2+}}^A$ ) im Aragonit zum Verhältnis ( $m_{\text{Sr}^{2+}}^L / m_{\text{Ca}^{2+}}^L$ ) in der Lösung wird durch das Nernst'sche Verteilungsgesetz beschrieben:

$$k_{\text{Sr}}^A = \frac{\frac{m_{\text{Sr}^{2+}}^L}{m_{\text{Ca}^{2+}}^L}}{\frac{m_{\text{Sr}^{2+}}^A}{m_{\text{Ca}^{2+}}^A}} \quad (7)$$

$m_{\text{Sr}^{2+}}^A$  = Mole  $\text{Sr}^{2+}$  im ausgefällten Aragonit

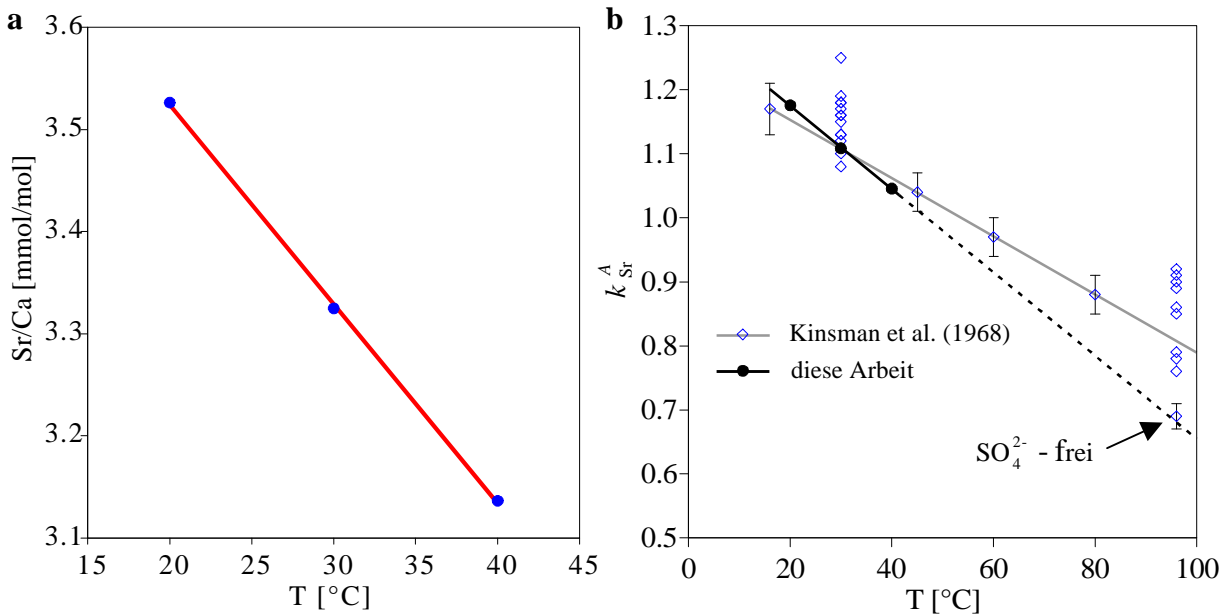
$m_{\text{Ca}^{2+}}^A$  = Mole  $\text{Ca}^{2+}$  im ausgefällten Aragonit

$m_{\text{Sr}^{2+}}^L$  = Mole  $\text{Sr}^{2+}$  in der Lösung

$m_{\text{Ca}^{2+}}^L$  = Mole  $\text{Ca}^{2+}$  in der Lösung

$K_{\text{Sr}}^A$  = Verteilungskoeffizient

Die Sr/Ca-Verhältnisse des Aragonits wurden mittels TIMS bestimmt. Mit diesem Experiment soll die Anwendung der Sr/Ca-Verhältnisse im Korallen-Aragonit als Thermometer überprüft werden. Im Bereich von 20 bis 40°C kann die Temperaturabhängigkeit des Sr/Ca-Verhältnisses im ausgefällten Aragonit als linear betrachtet werden (Abb. 4a). Dieses Ergebnis deckt sich mit dem von Kinsman & Holland (1969) durchgeführten Experiment, in dem zwischen 16 und 96°C eine lineare Temperaturabhängigkeit des Sr-Verteilungskoeffizienten  $K_{\text{Sr}}^A$  im aus Meerwasser ausgefällten Aragonit nachgewiesen werden konnte. Der abweichende Verlauf der Regressionsgeraden (Abb. 4b) ist durch die unterschiedliche Zusammensetzung der Ausgangslösungen bedingt. Unsere Regressionsgerade schneidet in der Verlängerung den von Kinsman & Holland (1969) bei 96°C gemessenen  $K_{\text{Sr}}^A$ , bei dem der Aragonit wie in unserem Experiment ebenfalls aus Sulfat-freier Lösung gefällt wurde.

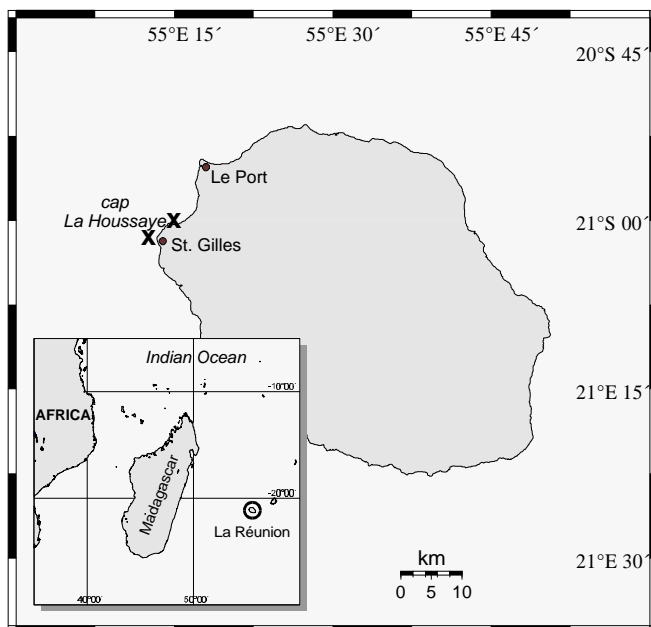


**Abb. 4** (a) Sr/Ca-Verhältnisse in Aragonit in Abhängigkeit von der Temperatur. Der Aragonit wurde aus Sulfat-freier Lösung ausgefällt. In (b) werden die Verteilungskoeffizienten  $K_{\text{Sr}}^A$  im aus Sulfat-freier Lösung ausgefällten Aragonit mit den Ergebnissen von Kinsman & Holland (1969) verglichen, wobei dort die nahezu lineare Temperaturabhängigkeit des  $K_{\text{Sr}}^A$  im aus Meerwasser ausgefällten Aragonit im Bereich von 16-96°C nachgewiesen wurde. Bemerkenswert ist, daß die Verlängerung unserer Geradengleichung einen  $K_{\text{Sr}}^A$ -Wert von Kinsman & Holland (1969) schneidet, bei dem ebenfalls Aragonit aus sulfatfreier Lösung ausgefällt wurde ( $\text{SO}_4^{2-}$  - frei).

## 4 Sr/Ca- und U/Ca-Thermometrie an Korallen des West-Indiks

### 4.1 Untersuchungsgebiete

An der Nordwest-Küste der Insel La Réunion (Abb. 5) wurden 3 Kerne genommen. Zwei davon, Kern 91 und Kern 93 in 50 m Entfernung zueinander in 6.4 bzw. 7.7 m Wassertiefe. Sie stammen aus einem dem Cap La Houssaye vorgelagerten Riff. Ein weiterer Kern (Kern 98) wurde in etwa 5 km Entfernung, nahe Saint Gilles, in 12.3 m Wassertiefe gebohrt. Die Korallen wachsen auf einer Basaltplattform in unmittelbarer Umgebung des offenen Indischen Ozeans. An der Westküste von La Réunion ist der Süßwassereintrag gering und auf die Regenzeit beschränkt. Am Cap La Houssaye findet kein Süßwassereintrag statt (Guillaume, 1988).



**Abb. 5** Probenlokalität La Réunion (55°15' E, 21°00' S), nahe Cap La Houssaye. Die *Porites lutea* Korallenkerne LR91 und LR93 wurden in 6.4 m bzw. 7.7 m Wassertiefe gebohrt. Die beprobten Korallen liegen in etwa 50 m Entfernung zueinander.

Kern 98 wurde nahe St.Gilles in 12.3 m Wassertiefe gebohrt. Die Entfernung zu den anderen beiden Korallen beträgt ca. 5 km.

### 4.2 Wachstumsraten

In den untersuchten Abschnitten der 3 beprobten La Réunion-Korallen betragen die mittleren jährlichen Wachstumsraten 10 bis 11 mm/a.

Eine relativ exakte chronologische Zuordnung der Sr/Ca-Verhältnisse zu den jeweils vorherrschenden SST's läßt sich wahrscheinlich lediglich im Fall der Extrema vornehmen, da ein Sr/Ca-Minimum bzw. Maximum einem Temperatur-Maximum bzw. Minimum einer Zeitreihe zugeordnet werden kann. Die zwischen den Extrema liegenden Sr/Ca-Verhältnisse werden durch lineare Interpolation den entsprechenden SST's zugeordnet. Damit wird gleichmäßiges Wachstum zwischen den Extrema vorausgesetzt. Hinweise darauf, daß die Wachstumsraten zwischen den Extrema nicht konstant sind, werden in Kap. 4.2.2 beschrieben.

Wachstumsraten-Bestimmungen mittels Röntgenaufnahmen können fehlerhaft sein, da häufig kein scharfer Übergang zwischen den einzelnen Zuwachsringen erkennbar ist. Sind die

Bohrabstände bekannt, so lassen sich auch mit Hilfe der Sr/Ca-Verhältnisse die Wachstumsraten zwischen den Extrema bestimmen. In Tabelle 3 sind die halbjährlichen Wachstumsraten der untersuchten Kerne aufgeführt.

**Tabelle 3** Jährliche und halbjährliche Wachstumsraten [mm/a] der drei beprobten *Porites*-Korallen der Probenlokation La Réunion im Westindik. Dabei wurde in Frühjahr und Herbst unterteilt. Herbst umfaßt etwa den Zeitraum von Februar bis August, in dem die SST abfällt. Frühjahr umfaßt den Zeitraum von etwa August bis Februar des darauffolgenden Jahres, in dem die SST ansteigt. An der Lokation Abrolhos Island entsprechen Herbst und Frühjahr dem Zeitraum von April bis Oktober bzw. Oktober bis April des darauffolgenden Jahres.

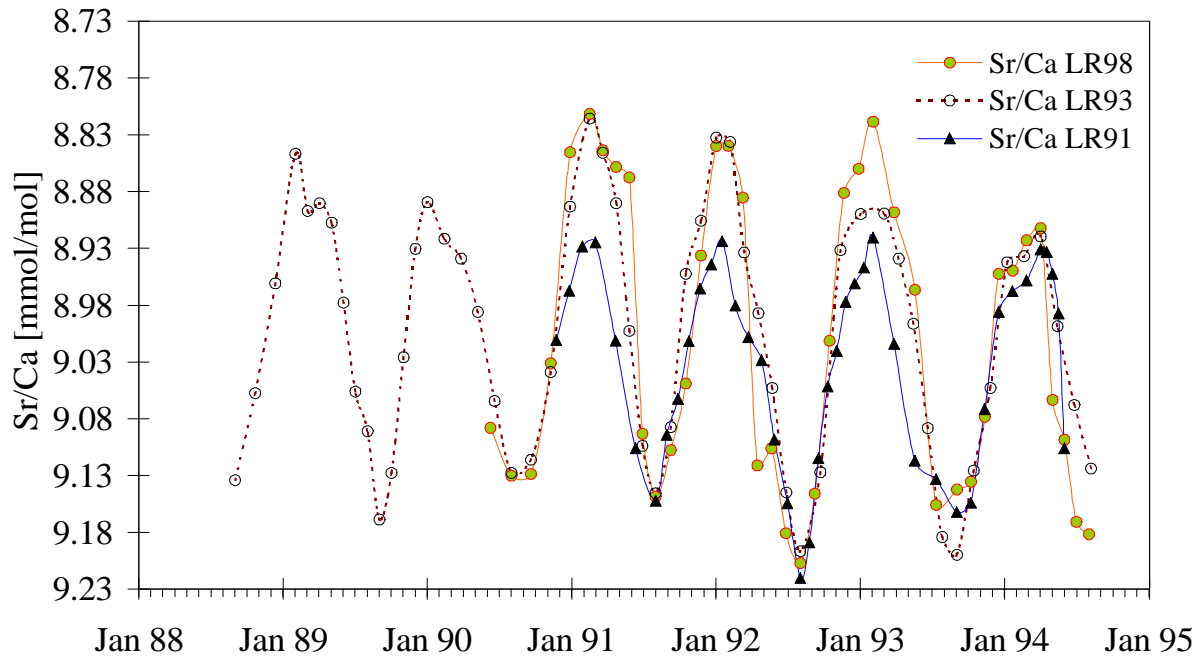
	LR 91			LR 93			LR 98		
	Jahr	Frühjahr	Herbst	Jahr	Frühjahr	Herbst	Jahr	Frühjahr	Herbst
1994									12
1993	9	10	7	9	9	9	9	10	7
1992	13	16	11	9	7	10	10	10	10
1991	10	13	7	10	10	11	11	10	11
1990				8	7	8		7	
1989				12	12	12			
1988					7				
<b>Mittel</b>	<b>11±4</b>	<b>13±5</b>	<b>8±4</b>	<b>10±3</b>	<b>9±4</b>	<b>10±2</b>	<b>10±2</b>	<b>9±2</b>	<b>9±4</b>

#### 4.2.1 Einfluß der Wachstums- bzw.-Kalzifikationsrate auf das Sr/Ca-Verhältnis

Bisher herrschen widersprüchliche Ergebnisse über den Einfluß der Wachstums- [mm/a] oder Kalzifikationsrate [ $\text{g/cm}^2 \cdot \text{a}$ ] auf das Sr/Ca-Verhältnis in Korallen vor. Weber (1973) findet an *Acropora* eine negative Korrelation zwischen Wachstums- bzw. Kalzifikationsrate und Sr/Ca-Verhältnis. Auch de Villiers et al. (1995) finden an *Pavona clavus* höhere Sr/Ca-Verhältnisse in langsamer wachsenden Abschnitten. Unterschiedliche Wachstumsraten von 6 und 14 mm/a würden den Untersuchungsergebnissen zufolge Sr/Ca-SST-Änderungen von 2-4°C bewirken. Dagegen können Gagan et al. (1998) an *Porites lutea* mit Zuwachsraten zwischen 8 und 24 mm/a keinen Einfluß der Kalzifikations- und Wachstumsrate auf das Sr/Ca-Verhältnis finden.

Relativ zu den großen Temperatur- und möglicherweise Salinitäts-bedingten Änderungen des U/Ca-Verhältnisses in *Pavona*-Korallen können Shen & Dunbar (1995) nur geringe Anzeichen für höhere U/Ca-Verhältnisse an langsamer wachsenden Abschnitten feststellen.

Um einen möglichen Wachstumseinfluß auf das Sr/Ca-Verhältnis abzuschätzen, werden in dieser Arbeit 3 *Porites lutea* Korallen der Probenlokation La Réunion im Westindik untersucht. Die halbjährlichen Zuwachsraten wurden anhand der Sr/Ca Verhältnisse berechnet (Abb. 6, Tabelle 3).



**Abb. 6** Sr/Ca-Verhältnisse der drei beprobten *Porites*-Korallen der Probenlokation La Réunion. Die Einzelproben sind mit einem numerisch gesteuerten Bohrer im Abstand von 1 mm genommen worden. Zur Berechnung der halbjährlichen Zuwachsraten wurden die Sr/Ca-Extrema den jeweiligen SST-Extrema zugeordnet. Dadurch wird auch eine zeitliche Zuordnung der Sr/Ca-Extrema erreicht, mit der halbjährliche Zuwachsraten errechnet werden können. In den Fällen, wo zwei Sr/Ca-Verhältnisse auf ein SST-Extremwert zutreffen könnten, wie z.B. im Februar 93, wird die zeitliche Zuordnung zwischen den beiden Sr/Ca-Extremwerten gelegt. In diesen Fällen wird davon ausgegangen, daß der korrekte Sr/Ca-Extremwert zwischen den gesetzten Probebohrungen liegt.

Für den Kern LR 93 und LR 98 stimmen die Amplituden der Sr/Ca-Verhältnisse sehr gut überein. Die Abweichung im Februar 93 beruht wahrscheinlich darauf, daß dort das Sr/Ca-Minimum nicht durch die Beprobung im 1 mm-Abstand erfaßt wurde. Die Unterschiede der jährlichen Wachstumsraten im Zeitraum von 1991 bis 1994 sind mit  $\pm 1$  mm ebenfalls gering. Die beiden Kerne liegen in ca. 5 km Entfernung zueinander. Im Kern LR91, der in nur ca. 50 m Entfernung vom Kern LR 93 genommen wurde, erreichen die Sr/Ca-Minima zumeist nicht die Minima der beiden anderen Kerne. Auffällig ist, daß im Gegensatz zu den Sr/Ca-Minima die Sr/Ca-Maxima aller drei Kerne gut übereinstimmen (Abb. 6).

Um einen möglichen Wachstumsraten-Einfluß in Bezug auf die Sr/Ca-Minima festzustellen, sollen die Wachstumsraten im Zeitraum von ca. August bis Februar des darauffolgenden Jahres (im folgenden als Frühjahr bezeichnet<sup>1</sup>) verglichen werden, da in diesem Zeitraum auch die Änderung von Sr/Ca-Maximum zu Sr/Ca-Minimum stattfindet. Während der vergleichbaren 3 Jahresabschnitte weist der Kern LR 91 in den Jahren 1991 und 1992 mit 13 und 16 mm/a gegenüber den anderen beiden Kernen, die Wachstumsraten von 7 bis 10 mm/a besitzen, höhere Wachstumsraten auf. In diesen zwei Jahren erreichen die Sr/Ca-Minima dieses Kerns auch nicht die Minima der beiden anderen Kerne. Gleiches trifft wahrscheinlich

<sup>1</sup> Das Frühjahr 1990 erstreckt sich beispielsweise von August 1990 bis Februar 1991, wobei das zugehörige Sr/Ca-Maximum im August 1990 und das Sr/Ca-Minimum im Februar 1991 liegt.

auch für das Frühjahr 1990 zu. Hier konnte jedoch die Wachstumsrate für den Kern LR91 nicht vollständig bestimmt werden. Im Frühjahr 1993 stimmen die Sr/Ca-Minima aller drei Kerne weitgehend überein. In diesem Fall zeigen auch die Frühjahrs-Wachstumsraten an allen drei Kernen mit 9-10 mm/a geringe Unterschiede.

Diese Beobachtungen lassen auf eine positive Korrelation zwischen Frühjahrswachstum und Sr/Ca-Verhältnis schließen: Je schneller das Wachstum, desto höher das Sr/Ca-Verhältnis. Dieser Befund steht im direkten Widerspruch zu Weber (1973) und de Villiers et al. (1995), wonach geringere Zuwachsraten höhere Sr/Ca-Verhältnisse aufweisen.

Aus Abb. 7 geht hervor, daß die Wachstumsgeschwindigkeit im Frühjahrs-Abschnitt mit steigender SST stetig zunimmt und an den Sr/Ca-Minima (Sommer) die höchsten Raten erreicht. Der Unterschied der absoluten Wachstumsraten direkt an den Sr/Ca-Minima ist somit weit stärker, als durch die mittleren halbjährlichen Wachstumsraten in Tabelle 3 angegeben. Die mittleren Wachstumsraten im Herbstabschnitt, in dem die Änderung vom Sr/Ca-Maximum zum Sr/Ca-Minimum stattfindet, liegen bei allen drei Kernen zwischen 7 und 11 mm/a und sind an den Sr/Ca-Maxima noch geringer als die angegebenen Mittelwerte. In den Herbstabschnitten 1992 und 1993 weist der Kern mit der höchsten Wachstumsrate auch das höchste Sr/Ca-Maximum auf. Die Korrelation ist also die gleiche wie auch an den Sr/Ca-Minima beobachtet wird. Eine Ausnahme bildet der Herbstabschnitt 1991. Hier sind die Sr/Ca-Maxima aller drei Kerne nahezu identisch, trotz der um 3 mm/a geringeren Wachstumsrate des Kerns LR91 gegenüber den anderen beiden Kernen. Es fällt jedoch an den Sr/Ca-Maxima auch generell eine geringere Variation zwischen den Sr/Ca-Verhältnissen der 3 Korallen auf, als dies bei den Sr/Ca-Minima der Fall ist. Der Grund hierfür könnten geringere absolute Unterschiede der Wachstumsraten zwischen den Sr/Ca-Maxima gegenüber den Sr/Ca-Minima sein. Eine positive Korrelation zwischen Herbstzuwachsrate und Sr/Ca-Verhältnis sollte bei stärker variierenden Herbstwachstumsraten ebenfalls auftreten.

Ursache für die durchschnittlich höheren Wachstumsraten des Kerns LR91 kann die geringere Wassertiefe sein, in der diese Koralle gegenüber den anderen beiden Korallen wächst. Auch Weber (1973) nehmen eine inverse Korrelation zwischen Wachstumsrate und Wassertiefe an. Die Wassertiefe bis zur Oberfläche der Koralle beträgt für den Kern LR91 6.4 m, für die Kerne LR93 und LR98 7.7 bzw. 12.3 m. Ein Trend kann damit nicht festgestellt werden. Eventuell wird dieser durch weitere Einflußfaktoren verdeckt. Jedoch weist der Kern LR91 erwartungsgemäß die geringste Wassertiefe auf.

Die hier anhand von 3 Korallen gefundene positive Beziehung zwischen Wachstumsrate und Sr/Ca-Verhältnis im Korallen-Aragonit muß durch weitere Untersuchungen an Korallen dieser Lokalität überprüft werden. Auch sollten, wie bei de Villiers et al. (1995) an *Pavona clavus*, verschiedene Wachstumsrichtungen einer Koralle untersucht werden.

#### 4.2.2 Zeitliche Zuordnung der Element-Verhältnisse

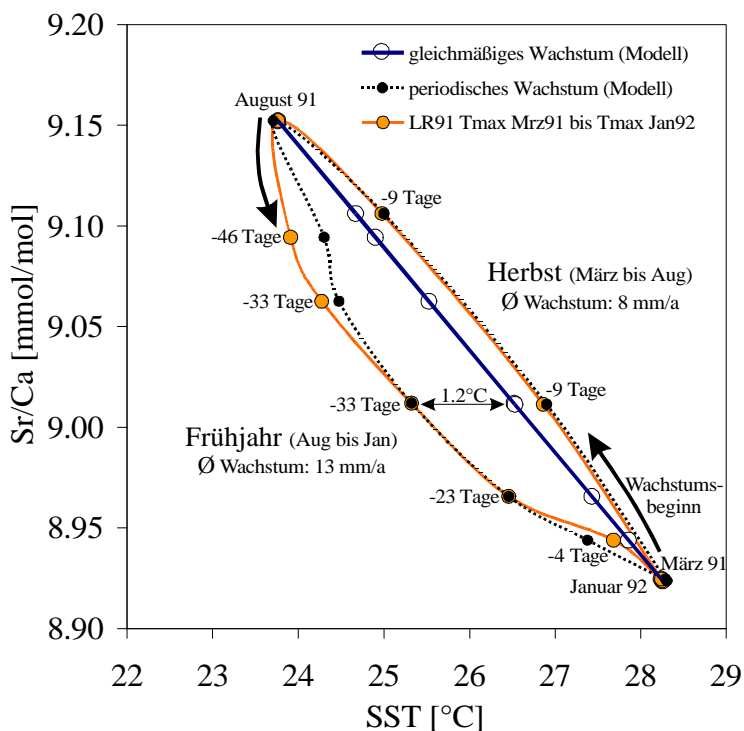
Aufgrund des von Kinsman & Holland (1969) und in dieser Arbeit gefundenen negativen linearen Zusammenhangs zwischen Temperatur und Sr/Ca-Verhältnissen im anorganisch ausgefällten Aragonit kann für organisch gefällten Korallen-Aragonit angenommen werden, daß ein Sr/Ca-Minimum einem SST-Maximum entspricht bzw. ein Sr/Ca-Maximum einem SST-Minimum. Damit läßt sich eine relativ exakte, jedoch nur punktuelle chronologische Zuordnung der Sr/Ca-Extremwerte durchführen.

Bei der Sr/Ca-SST-Kalibrierung wurden monatlich gemittelte SST-Werte verwendet. Da der Durchmesser der Probenbohrungen konstant ist, repräsentieren die untersuchten Proben bei unterschiedlichen Wachstumsgeschwindigkeiten jedoch einen Mittelwert über unterschiedlich lange Zeitintervalle. Die Abweichungen zwischen Sr/Ca-SST-Extrema und NCEP-SST-Extrema betragen im Mittel jedoch nur unter  $0.3^{\circ}\text{C}$ .

Inwieweit unterschiedliche Wachstumsraten zu Fehlern in der SST-Zuordnung von Sr/Ca-Verhältnissen führen können, soll an einem Wachstumsabschnitt des La Réunion-Kerns LR91 verdeutlicht werden (Abb. 7). Die drei Sr/Ca-Extremwerte konnten relativ exakt zeitlich und damit einer Temperatur zugeordnet werden. Bei Annahme einer linearen Sr/Ca-SST-Beziehung, wie sie in Kapitel 3.4 experimentell nachgewiesen wurde, sollten alle zwischen den Extremwerten liegenden Sr/Ca-Verhältnisse auf einer Geraden zwischen den Extrema liegen und somit die inverse Sr/Ca-SST-Beziehung im Korallen-Aragonit widerspiegeln. Bei der Zuordnung der zwischen den Extrema liegenden Sr/Ca-Verhältnisse ist es üblich, zur Vereinfachung von gleichmäßigen Wachstumsraten auszugehen. Abb. 7 zeigt, daß die Sr/Ca-Verhältnisse aufgrund zeitlicher Zuordnungsfehler der Probebohrungen infolge periodischer Wachstumsschwankungen systematisch von der linearen Sr/Ca-SST-Beziehung abweichen. Die Wachstumsraten im Jahr 1991 waren im Herbstabschnitt mit durchschnittlich 8 mm/a niedriger als im Frühjahrsabschnitt, in dem durchschnittlich 13 mm/a erreicht wurden. In diesem Abschnitt treten auch die höchsten Abweichungen von der linearen Wachstumsfunktion auf. Nach dem Sr/Ca-Minimum im August 91, dessen Bildungszeitraum relativ exakt zeitlich zugeordnet werden kann, folgt ein im Bezug zur linearen Sr/Ca-SST-Beziehung scheinbar zu niedriges Sr/Ca-Verhältnis. Das gemessene Verhältnis von 9.09 mmol/mol wurde unter Annahme gleichmäßiger Wachstumsraten einer SST von  $23.9^{\circ}\text{C}$  zugeordnet. In Hinblick auf die lineare Sr/Ca-SST-Beziehung entspricht dieses Sr/Ca-Verhältnis jedoch einer SST von  $24.9^{\circ}\text{C}$ , einer Temperatur, die erst 46 Tage später auftritt. Die interpolierte Zeitspanne ist demnach zu hoch. Die Erklärung hierfür sind die geringen Wachstumsraten im Winter. Zwischen den Probebohrungen liegen dann größere Zeitabstände als im Sommer, wo höhere SST's höhere Wachstumsraten ermöglichen. Bei gleichbleibendem Probenabstand wird der Fehler in der zeitlichen Zuordnung so lange zunehmen, bis die Wachstumsgeschwindigkeit zum Sommer hin wieder ansteigt. Bei einer Wachstumsrate, die der durchschnittlichen



Wachstumsrate zwischen zwei Extremwerten entspricht, bleibt die Größe des Zuordnungsfehlers erhalten und nimmt erst wieder ab, wenn die Wachstumsgeschwindigkeit zum Sommer hin weiter zunimmt (siehe Abb. 7, Abschnitt Frühjahr). Schließlich kann die Wachstumsgeschwindigkeit so weit zunehmen, daß ein scheinbar zu hohes Sr/Ca-Verhältnis gemessen wird, das einem noch vor dem interpolierten Zeitpunkt entspricht (siehe Abb. 7, Abschnitt Herbst). Somit kann aufgrund unterschiedlicher Wachstumsgeschwindigkeiten, sowie Beprobungsdichte die chronologische Zuordnung der zwischen den Extrema liegenden Sr/Ca-Verhältnisse Fehlern unterliegen. Um diese auszuschließen, wurden in dieser Arbeit die Sr/Ca-SST-Geradengleichungen nur aus den Extrema berechnet.



**Abb. 7** Wachstumsabschnitt des Jahres 1991 im Kern LR91 der Lokalität La Réunion. Bei der zeitlichen Zuordnung der Sr/Ca-Verhältnisse zu den entsprechenden SST wurde gleichmäßiges Wachstum zwischen den Extremwerten angenommen. Es zeigen sich jedoch systematische Abweichungen, die auf ein periodisches Wachstum schließen lassen. In einem Modell wurden durch eine Sinusfunktion, die periodischen Wachstumsschwankungen entspricht, Abweichungen von der linearen Sr/Ca-SST-Beziehung erzeugt. Die im Modell erzeugten Abweichungen entsprechen den tatsächlichen weitgehend.

Bei Betrachtung des oben dargestellten Beispiels kann vermutet werden, daß bei Anwendung der aus allen Daten erstellten Sr/Ca-SST-Geradengleichung zu niedrige SST für ein gegebenes Sr/Ca-Verhältnis berechnet werden. Dies ist im Kern LR91, aus dem der in Abb. 7 dargestellte Wachstumsabschnitt stammt, auch der Fall (siehe Anhang 10.1), obwohl die Abweichung gering ist. Im Vergleich zu der nur aus den Extremwerten berechneten Geradengleichung und bei Verwendung des NCEP-SST Datensatzes beträgt sie etwa 0.3°C. Auch in den anderen untersuchten Korallen gehen die Abweichungen nicht über 0.5°C hinaus, da sich die Abweichungen in der Summe teilweise aufheben.

### 4.3 SST-Daten

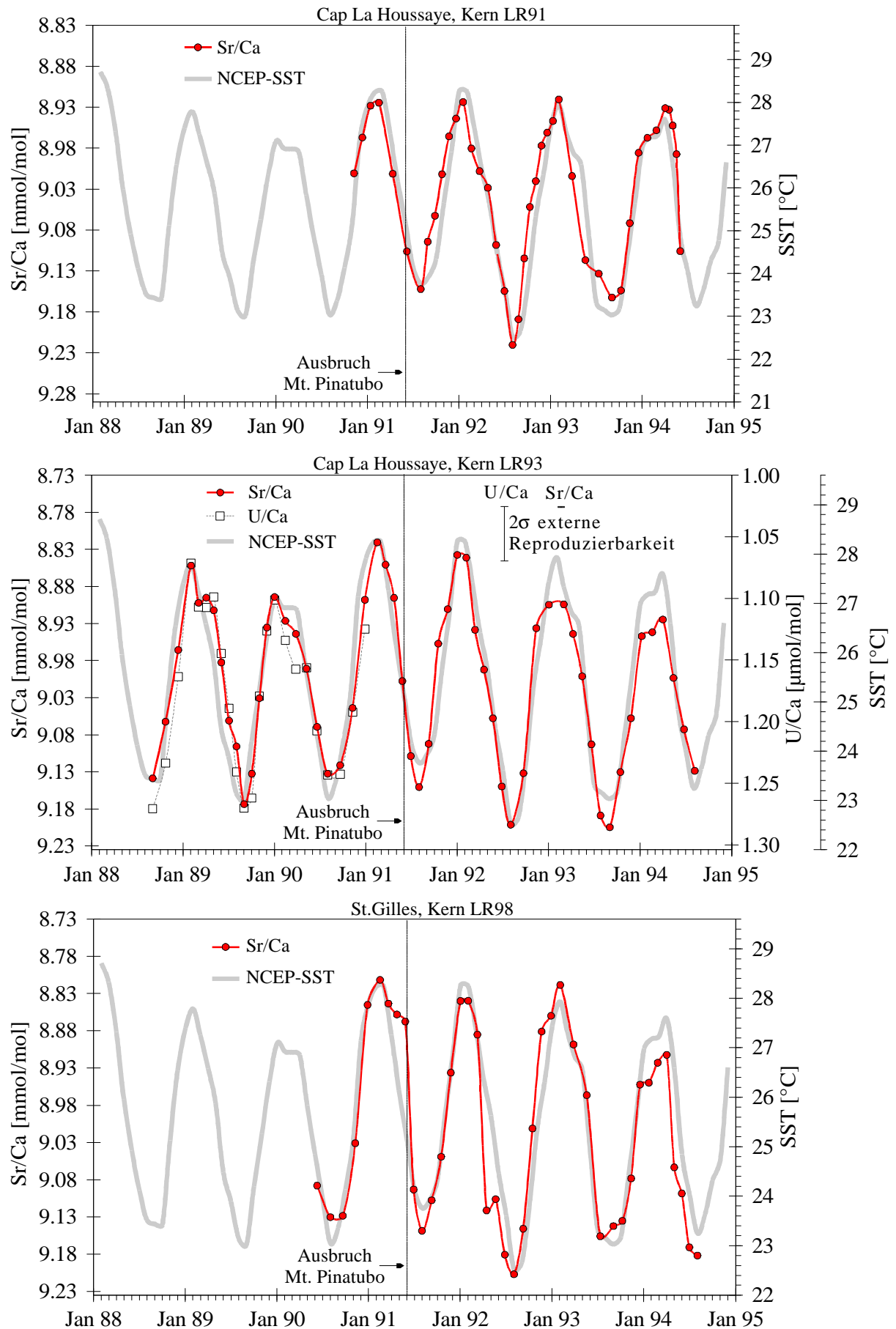
In dieser Arbeit wurden für die Sr/Ca-SST-Kalibrierung NCEP-SST-Daten mit monatlicher Auflösung verwendet, welche sich aus Schiffs- bzw. Bojenmessungen und Satellitenmessungen zusammensetzen (Reynolds & Smith, 1994). Verglichen wurden diese Daten mit einer kurzen Meßreihe einer naheliegenden Meßstation und COADS-SST, die ausschließlich auf Schiffs- und Bojenmessungen basieren. COADS-Daten werden über ein 2°-Netz, Satellitendaten über ein 1°-Netz (ca. 100 x 100 km) interpoliert. Die verwendeten Koordinaten der NCEP- und COADS-Datensätze sind 21°S, 55°2'E. Die Koordinaten der Meßstation Le Port sind 20°55'S, 55°17'E.

Die Differenz aus monatlichen COADS- und NCEP-SST's, gemittelt über den Zeitraum von 1988 bis 1993 beträgt 0.1°C, die mittlere absolute Abweichung 0.34°C. Beide Datensätze korrelieren mit  $r = 0.998$  ( $n = 71$ ). Zwischen 12 monatlichen Meßstations- und NCEP-SST-Werten der Jahre 1993/94 besteht eine Korrelation von  $r = 0.995$ , die mittlere absolute Abweichung beträgt 0.1°C.

### 4.4 Sr/Ca- und U/Ca-SST-Beziehung

An den untersuchten Abschnitten der La Réunion-Kerne repräsentieren die Sr/Ca-Verhältnisse einen zeitlichen Mittelwert von ca. einem Monat. Die gemessenen Sr/Ca-Verhältnisse wurden mit den monatlichen Mittelwerten der NCEP-SST verglichen. Dabei erfolgte zunächst die Zuordnung der SST-Extrema zu den entsprechenden Sr/Ca- bzw. U/Ca-Verhältnissen. Die übrigen Elementverhältnisse wurden durch lineare Interpolation den entsprechenden SST's zugeordnet. Abb. 8 zeigt die deutlichen saisonalen Schwankungen der Sr/Ca- und U/Ca-Verhältnisse, die mit dem Verlauf der SST in Phase sind.

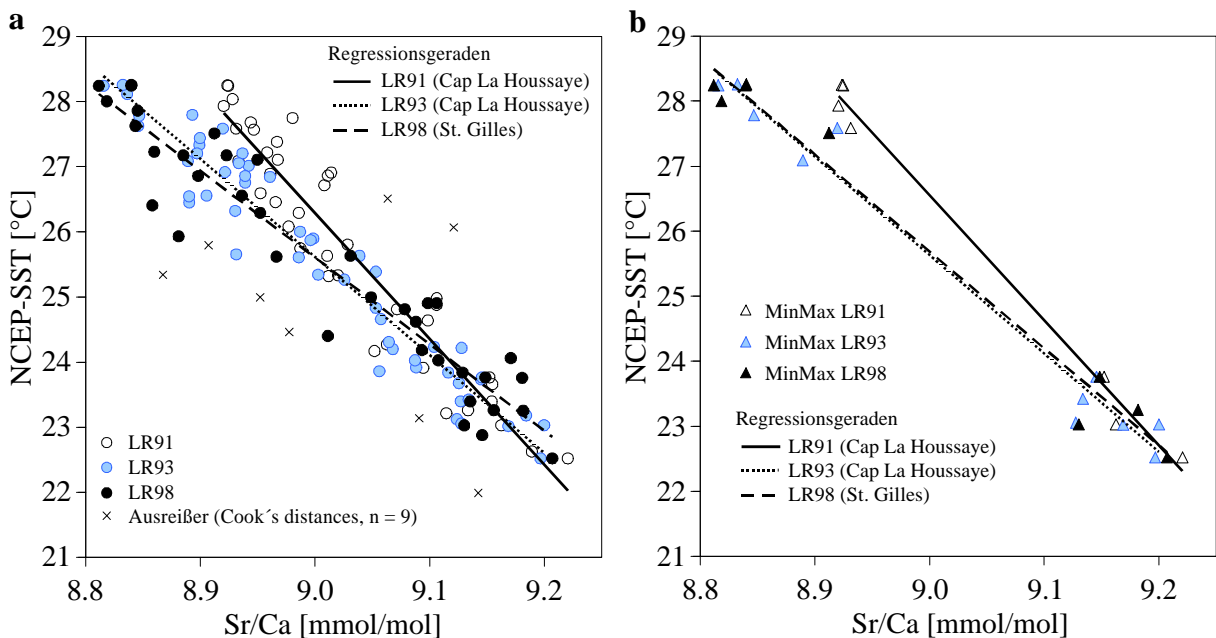
Für die untersuchten Korallen variieren die Unterschiede von Minima zu Maxima im Sr/Ca-Verhältnis um ca. 3.5% (mittlerer Maximum-Wert dividiert durch mittleren Minimum-Wert minus 1 mal 100%). Die im Kern LR93 untersuchten U/Ca-Verhältnisse weisen Unterschiede von ca. 16% auf. Gegenüber den Sr/Ca-Verhältnissen zeigen die U/Ca-Verhältnisse eine ca. 4.5-fach höhere Amplitude.



**Abb. 8** Vergleich von Sr/Ca- und U/Ca-Verhältnissen von *Porites lutea* mit SST-Daten, Lokalität La Réunion Island. Die 2σ -externe Reproduzierbarkeit von Sr/Ca ist geringer als die Datenpunktgröße.

#### 4.4.1 Sr/Ca-SST-Beziehung

Abb. 9a zeigt die an den beprobten Kernen gemessenen Sr/Ca-Verhältnisse in Abhängigkeit der ihnen zugeordneten SST sowie die jeweils resultierenden Regressionsgeraden. Aufgrund der besseren zeitlichen Zuordnung wurden jedoch für die Berechnung der Geradengleichungen lediglich die Extremwerte verwendet (Abb. 9b). Auffällig ist die sehr gute Übereinstimmung der Sr/Ca-SST-Beziehung im Kern LR93 und LR98. Steigung und Achsenabschnitt stimmen zu je <1% miteinander überein. Die mittlere und maximale SST-Abweichung zwischen beiden Geraden beträgt 0.06°C bzw. 0.14°C. Hingegen weist die Geradengleichung aus Kern LR91 gegenüber den Geradengleichungen LR93 und LR98 mittlere und maximale SST-Abweichungen von ca. 0.7°C bzw. 1.4°C auf. Steigung und Achsenabschnitt weichen von den Geradengleichungen LR93 und LR98 um ca. 30% bzw. 25% ab.



**Abb. 9** SST-Daten vs. Sr/Ca-Verhältnisse in den untersuchten Kernen. Ein Ausreißertest wurde mit Hilfe der Cook's Distanz durchgeführt. In (a) sind die gesamten Daten und die daraus bestimmten Regressionsgeraden, in (b) die Extrema und die daraus bestimmten Regressionsgeraden dargestellt. Der Fehler des Sr/Ca-Verhältnisses ist geringer als die Punktgröße.

Bemerkenswert ist die gute Übereinstimmung der Sr/Ca-Maxima in Abhängigkeit zur SST in allen drei untersuchten Kernen (Abb. 9b). Die Abweichung der Regressionsgerade des Kerns LR91 zu den Geraden LR93 und LR98 wird lediglich durch die Sr/Ca-Minima vs. SST hervorgerufen. Der Kern LR91 weist gegenüber den anderen beiden Kernen auch z.T. erhebliche Wachstumsunterschiede innerhalb eines Jahres auf. Möglicherweise sind die gegenüber den anderen Geradengleichungen im Bezug zur SST zu hohen Sr/Ca-Verhältnisse auf die starken Unterschiede der Wachstumsraten im Frühjahrsverlauf zurückzuführen (siehe Kap. 4.2.1).

Für die Kerne LR93 und LR98 wurde aus den Extremwerten eine Geradengleichung berechnet:

$$\text{SST } [^{\circ}\text{C}] = 160.92 - 15.029 \cdot \text{Sr/Ca [mmol/mol]} \quad (\text{LR93 + LR98}) \quad (8)$$

Für den Kern LR91 errechnet sich folgende Gleichung:

$$\text{SST } [^{\circ}\text{C}] = 199.73 - 19.242 \cdot \text{Sr/Ca [mmol/mol]} \quad (\text{LR91}) \quad (9)$$

Abweichungen zwischen der aus NCEP- und Sr/Ca-SST ermittelten Saisonalität betragen maximal 0.4°C (Tabelle 4).

**Tabelle 4** Vergleich von Minima- und Maxima-SST [°C] sowie der Saisonalität [°C] zwischen den NCEP- und Sr/Ca-SST Datensätzen der untersuchten Kernabschnitte. Für die Berechnung von Minima-, Maxima- und Saisonalität wurden jeweils die Extremwerte verwendet. Bei der Berechnungen der Sr/Ca-SST wurden alle Werte, einschließlich der für die Geradengleichung als Ausreißer deklarierten, verwendet.

	Min		Max		Saisonalität	
	NCEP	Sr/Ca	NCEP	Sr/Ca	NCEP	Sr/Ca
LR91	23.1	23.1	28.0	28.0	4.9	4.9
LR93	23.2	23.3	27.8	27.7	4.7	4.3
LR98	23.1	23.3	28.0	28.0	4.9	4.7

In Tabelle 5 sind für jeden Kern die absoluten Unterschiede zwischen NCEP-SST und der aus den Sr/Ca-Verhältnissen mit Hilfe der jeweiligen Geradengleichungen berechneten SST (Sr/Ca) aufgeführt. Die  $\Delta \text{SST}(\text{Sr/Ca})$ -Werte wurden jeweils mit der Geradengleichung aus den Min- und Maxima und der aus allen Datenpunkten eines Kerns berechnet. In beiden Fällen sind die berechneten  $\Delta \text{SST}(\text{Sr/Ca})$ -Werte für die Extrema (T-MinMax) 0.1 bis 0.3°C niedriger als für die dazwischenliegenden Werte ("restliche"), was mit der besseren chronologischen Zuordnung der Extremwerte erklärt werden kann (siehe 4.2.2). Einzelne, auf Wachstumsschwankungen beruhende Abweichungen der Sr/Ca-SST von der gemessenen NCEP-SST können, wie in Abb. 7 dargestellt, im Bereich von ca. 1°C liegen.

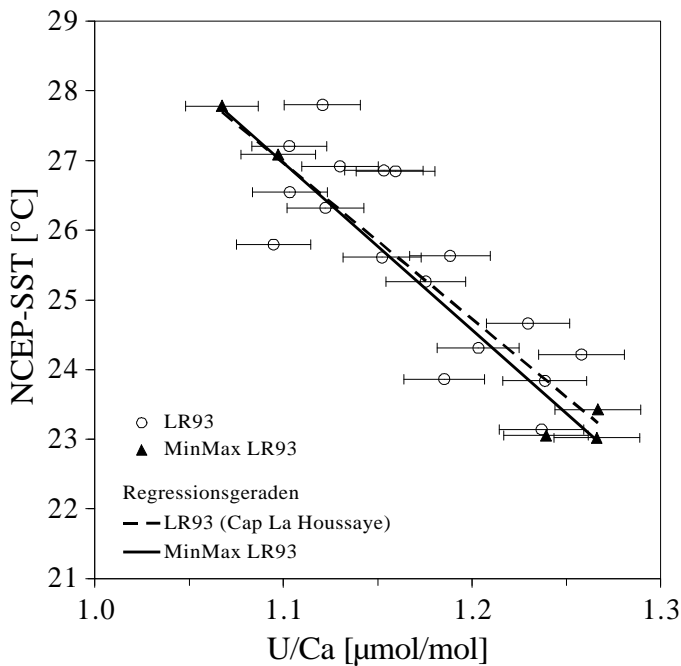
**Tabelle 5** Absolute mittlere Temperaturabweichungen [°C] zwischen berechneter Sr/Ca-SST und gemessener NCEP-SST. "T-Max" und "T-Min" sind die mittleren Abweichungen der SST-Maxima bzw. Minima, "T-MinMax" sind die mittleren Abweichungen aller Extrema, "restliche" sind die mittleren Abweichungen der zwischen den Extrema liegenden SST's. Bei den  $\Delta \text{SST}(\text{Sr/Ca})$ -Berechnungen wurden alle Werte, einschließlich der für die Geradengleichung als Ausreißer deklarierten, verwendet.

<b>Kern LR91</b>	T-Max	T-Min	T-MinMax	restliche	gesamt
Gleichung MinMax	0.23	0.25	0.24	0.56	0.51
Gleichung Gesamt	0.28	0.34	0.31	0.53	0.49
<b>Kern LR93</b>	T-Max	T-Min	T-MinMax	restliche	gesamt
Gleichung MinMax	0.26	0.31	0.29	0.45	0.42
Gleichung Gesamt	0.25	0.33	0.29	0.46	0.42
<b>Kern LR98</b>	T-Max	T-Min	T-MinMax	restliche	gesamt
Gleichung MinMax	0.34	0.35	0.34	0.64	0.59
Gleichung Gesamt	0.31	0.38	0.34	0.61	0.56

#### 4.4.2 U/Ca-SST-Beziehung

U/Ca-Messungen wurden am Kern LR93 durchgeführt. Aus den Extremwerten wurde folgende Geradengleichung berechnet:

$$\text{SST } [^{\circ}\text{C}] = 53.35 - 23.987 \cdot \text{U/Ca } [\mu\text{mol/mol}] \quad (\text{LR93}) \quad (10)$$



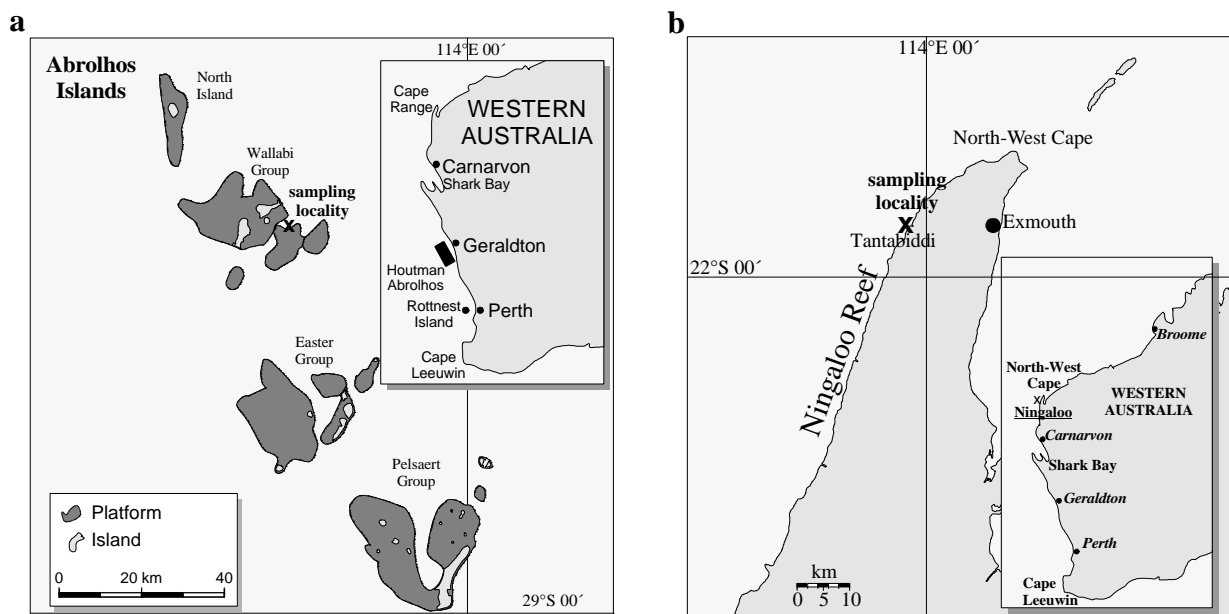
**Abb. 10** SST vs. U/Ca-Verhältnisse eines ca. 2-Jahres-Abschnittes im Kern LR93 (siehe Abb. 8). Der Korrelationskoeffizient für alle Daten beträgt  $r = -0.87$  ( $n = 23$ ).

Zwischen instrumentell gemessener NCEP-SST und mittels Geradengleichung 10 berechneter U/Ca-SST stimmt die aus den Extrema berechnete mittlere Saisonalität von 4.2 und 4.3°C sehr gut überein. Die absoluten mittleren Abweichungen der U/Ca- von der NCEP-SST betragen für die Extrema 0.23°C, für alle Werte 0.61°C.

## 5 Sr/Ca- und U/Ca-Thermometrie an Korallen des Ost-Indiks

### 5.1 Untersuchungsgebiete

Eine der beprobten Korallen stammt aus der Lagune der Wallabi Group, einer von 3 Inselgruppen der Houtman Abrolhos Islands. Beprobte wurde in 5 m Wassertiefe. Die Entfernung zum Festland beträgt ca. 75 km (Abb. 11a). Die Probenlokalität stellt einen der südlichsten Punkte im Indischen Ozean dar, an dem Korallen wachsen. Der Grund hierfür ist der Leeuwin-Strom, eine bis in ca. 150 m Tiefe (Thompson, 1984) reichende warme Oberflächenströmung, die im Winter am stärksten ist. Gegenüber dem Schelf-Meerwasser treten zu diesem Zeitpunkt an den Abrolhos Islands um etwa 4°C höhere SST auf (Pearce, 1997). Die Inselgruppe ist dem Schelfrand unmittelbar vorgelagert. Der Probenstandort selbst liegt zwar geschützt auf der dem Schelfrand abgekehrten Seite der Wallabi Group, jedoch existiert ein 30 m tiefer Kanal, der den raschen Meerwasser-Austausch gewährleistet.



**Abb. 11** (a) Probenlokalität Houtman Abrolhos Islands (28°27.7'S, 113°46.1'E) und (b) Probenlokalität Ningaloo Reef (21°54.3'S, 113°57.9'E) Die rezenten *Porites lutea* Bohrkerne sind 2.98 m und 2.8 m lang und schließen eine Zeitspanne von ca. 200 Jahren ein.

Ein zweiter Kern wurde ca. 800 km nördlich der Abrolhos Islands innerhalb der Lagune des Ningaloo Reefs, einem küstenparallelen Saumriff an der westaustralischen Küste, in 3 m Wassertiefe erbohrt (Abb. 11b). Die Entfernung zum Schelfrand beträgt ca. 10 km, zur Küste 1 km. Über die relativ niedrige Riffkrone findet ein rascher Austausch mit dem Meerwasser des offenen Ozeans innerhalb von 6 Stunden statt (Hearn et al., 1986). Die Nähe zur Schelfkante (ca. 10 km) läßt darauf schließen, daß das ausgetauschte Wasser größtenteils aus dem Leeuwin-Strom stammt (Hatcher, 1991). Aufgrund des ariden Klimas entlang der westaustralischen Küste ist durch Niederschläge eingetragenes Sedimentmaterial vernachlässigbar.

## 5.2 Wachstumsraten

Die Bestimmung der Wachstumsraten erfolgte wie im Kap. 4.2 beschrieben. Der Ningaloo Reef-Kern weist mittlere jährliche Zuwachsraten von 12 mm/a, der Abrolhos-Kern von 15 mm/a auf. In Bezug auf die Probenlokationen La Réunion und Ningaloo Reef treten im Abrolhos-Kern stärkere Schwankungen der halbjährlichen Wachstumsraten auf. Ursache hierfür könnten zeitweise nicht optimale Wachstumsbedingungen infolge kurzzeitiger Änderungen der SST durch die unterschiedliche Stärke und das im Bereich der Abrolhos-Insel starke Mäandrieren des Leeuwin-Stromes sein.

**Tabelle 6** Jährliche und halbjährliche Wachstumsraten in [mm/a] der beprobten *Porites*-Korallen der Probenlokation Abrolhos Island und Ningaloo Reef im Ostindik. Dabei wurde in Frühjahr und Herbst unterteilt (Erklärung siehe Tabelle 3 und Fußnote 1). Bei den Mittelwerten sind die  $2\sigma$ -Abweichungen angegeben.

	Abrolhos			Ningaloo		
	Jahr	Frühjahr	Herbst	Jahr	Frühjahr	Herbst
1993						10
1992				11	10	12
1991	17	21	13	14	11	17
1990	13	8	21	11	9	14
1989	16	12	19	12	11	13
1988				12	12	12
1987					14	
<b>Mittel</b>	<b>15±4</b>	<b>14±11</b>	<b>18±7</b>	<b>12±2</b>	<b>11±3</b>	<b>14±5</b>

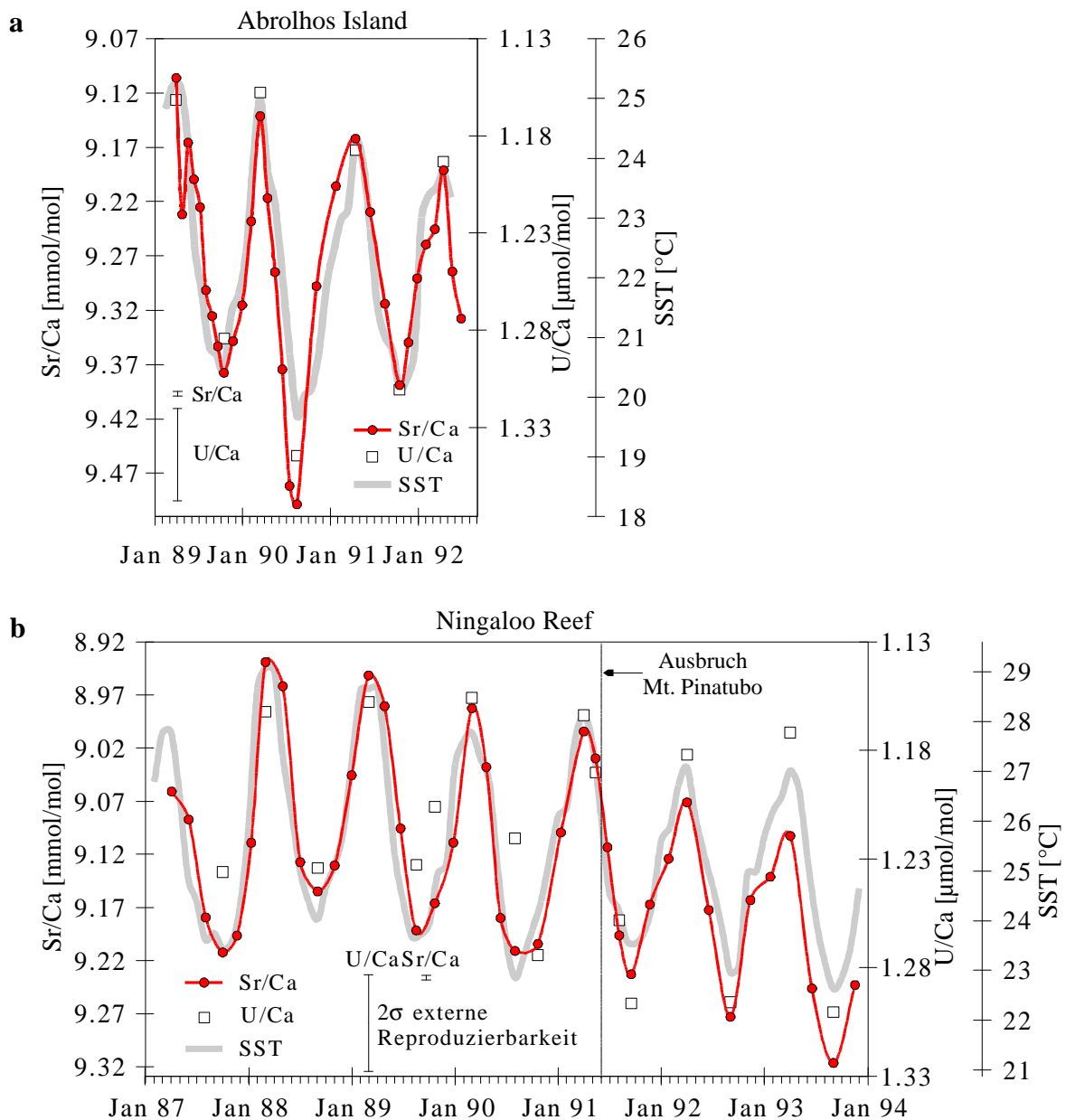
## 5.3 SST-Daten

Die verwendeten NCEP-SST-Daten wurden mit COADS-SST's von 1988-1993 verglichen. Da die COADS-SST-Daten für einige Koordinaten größere Datenlücken aufweisen, konnten nicht in jedem Fall übereinstimmende Koordinaten gewählt werden. Die Koordinaten der NCEP- und COADS-Datensätze für Abrolhos Island sind 28°2'S, 113°2'E; 29°0'S, 113°0'E, für Ningaloo Reef 21°5'S, 113°6'E; 21°5'S, 113°0'E. Die Korrelationskoeffizienten für beide SST-Datensätze betragen für die Lokalität Abrolhos Island  $r = 0.96$  ( $n = 72$ ) und für Ningaloo Reef  $r = 0.97$  ( $n = 72$ ). Die mittlere Abweichungen zwischen den Datensätzen beträgt für die Lokalität Ningaloo Reef +0.1°C. An der Lokalität Abrolhos Islands liegt die mittlere Abweichung zwischen NCEP- und COADS-SST's bei +0.36°C, was auf die um 8' näher zum Äquator liegenden Koordinaten des NCEP-Datensatzes zurückzuführen ist. Die mittleren absoluten Abweichungen betragen 0.36°C (Abrolhos) bzw. 0.45°C (Ningaloo).



#### 5.4 Sr/Ca- und U/Ca-SST-Beziehung

Beim untersuchten Abschnitt des Abrolhos-Kerns repräsentieren die Sr/Ca-Verhältnisse einen zeitlichen Mittelwert von ca. einem Monat. Die gemessenen Sr/Ca-Verhältnisse wurden, wie im Kapitel 4.3 beschrieben, mit den monatlichen Mittelwerten der NCEP-SST verglichen (Abb. 12).



**Abb. 12** Vergleich zwischen SST-Daten, Sr/Ca- und U/Ca-Verhältnissen in *Porites lutea*, Lokalität Abrolhos Island (a) und Ningaloo Reef (b). Besonders auffällig ist die in der Abrolhos-Koralle gegenüber der NCEP-SST tiefer liegende Sr/Ca- und U/Ca-SST im Winter 1990. Diese Abweichung könnte durch den Leeuwin-Strom verursacht worden sein, der ebenfalls im australischen Herbst und Winter am stärksten ist. Im Bereich der Abrolhos Islands mäandriert diese warme Oberflächenströmung besonders stark, so daß die lokale Sr/Ca- bzw. U/Ca-SST zeitweise stärkere Abweichungen von der NCEP-SST zeigen kann.

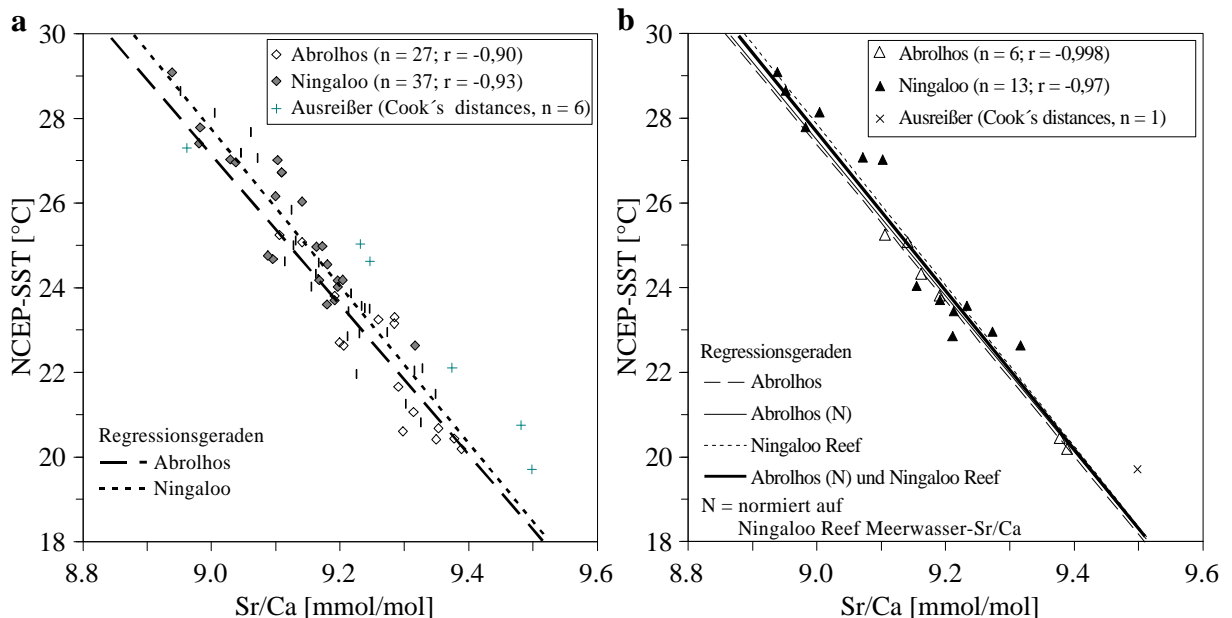
Für die untersuchten Korallen variieren die Unterschiede von Minima zu Maxima im Sr/Ca-Verhältnis des Ningaloo-Kernes um ca. 2.5% und im Abrolhos-Kern um ca. 3%. Die U/Ca-Verhältnisse weisen Unterschiede von ca. 9% für die Koralle des Ningaloo Reefs und ca. 12% für die Koralle der Abrolhos Islands auf. Gegenüber den Sr/Ca-Verhältnissen zeigen die U/Ca-Verhältnisse im Mittel 4 mal höhere Amplituden.

#### 5.4.1 Sr/Ca-SST-Beziehung

Die Steigungen und der Achsenabschnitt der Sr/Ca-SST-Regressionsgeraden beider Lokalitäten stimmen innerhalb von jeweils ca. 3% überein (Abb. 13a). Die mittlere bzw. maximale Temperaturabweichung zwischen den Geraden beträgt 0.4 bzw. 0.6°C im Bereich von 20–30°C. Während in Abb. 13a alle Daten in die Regression einbezogen wurden, erfolgte dies in Abb. 13b aufgrund der exakteren zeitlichen Zuordnung ausschließlich für die Extremwerte. Es ergeben sich daraus folgende SST-Sr/Ca-Beziehungen für die beiden Lokalitäten:

$$\text{SST } [^{\circ}\text{C}] = 193.11 - 18.415 \cdot \text{Sr/Ca [mmol/mol]} \quad (\text{Abrolhos Island}) \quad (11)$$

$$\text{SST } [^{\circ}\text{C}] = 199.07 - 19.023 \cdot \text{Sr/Ca [mmol/mol]} \quad (\text{Ningaloo Reef}) \quad (12)$$



**Abb. 13** SST-Daten vs. Sr/Ca-Verhältnisse in den beiden rezenten Kernen. Ein Ausreißertest wurde mit Hilfe der Cook's Distanz durchgeführt. In (a) sind die gesamten Daten und die daraus bestimmten Regressionsgeraden, in (b) die Extrema und die daraus bestimmten Regressionsgeraden dargestellt. Zudem wurde hier die Regressionsgerade der Abrolhos-Koralle auf das Sr/Ca-Meerwasserverhältnis des Ningaloo Reefs normiert.

Unterschiedliche Sr- und Ca-Meerwasserkonzentrationen zwischen den Probenlokationen können einen unterschiedlichen Achsenabschnitt der Regressionsgeraden verursachen (Shen et al., 1996). Deshalb wurde die Abrolhos-Gerade korrigiert, indem hier die Korallen-Sr/Ca-Verhältnisse auf das Sr/Ca-Meerwasserverhältnis des Ningaloo Reefs normiert wurden. Dabei wurde folgende Gleichung verwendet:

$$\text{Sr/Ca}_{\text{N Koralle a}} = \text{Sr/Ca}_{\text{Koralle a}} - (\text{Sr/Ca}_{\text{Meerwasser a}} - \text{Sr/Ca}_{\text{Meerwasser b}}) \quad (13)$$

$\text{Sr/Ca}_{\text{N Koralle a}}$  auf das Meerwasser der Lokalität b korrigiertes Korallen-Sr/Ca Verhältnis der Lokalität a [mmol/mol]

$\text{Sr/Ca}_{\text{Koralle a}}$  Sr/Ca-Verhältnis im Korallen-Aragonit der Lokalität a [mmol/mol]

$\text{Sr/Ca}_{\text{Meerwasser a}}$  Sr/Ca-Verhältnis im Meerwasser der Lokalität a [mmol/mol]

$\text{Sr/Ca}_{\text{Meerwasser b}}$  Sr/Ca-Verhältnis im Meerwasser der Lokalität b [mmol/mol]

Das Sr/Ca-Meerwasserverhältnis an der Probenlokation Abrolhos Island beträgt  $8.574 \pm 0.002$  mmol/mol, an der Ningaloo Reef-Lokation  $8.580 \pm 0.002$  mmol/mol. Der Unterschied von 0.006 mmol/mol zwischen beiden Lokalitäten ist gering. Aus der korrigierten Geradengleichung

$$\text{SST } [^{\circ}\text{C}] = 193.23 - 18.415 \cdot \text{Sr/Ca [mmol/mol]} \quad (\text{Abrolhos Island}) \quad (14)$$

berechnen sich gegenüber Gleichung 11 um  $0.12^{\circ}\text{C}$  höhere Temperaturen. Aufgrund der guten Übereinstimmung der Sr/Ca-SST-Kalibration für beide Lokalitäten wurde aus Gleichung 12 und 14 eine mittlere Gleichung bestimmt:

$$\text{SST } [^{\circ}\text{C}] = 196.15 - 18.719 \cdot \text{Sr/Ca [mmol/mol]} \quad (\text{Abrolhos + Ningaloo}) \quad (15)$$

Die maximale Temperaturdifferenz dieser mittleren zu den beiden einzelnen Geradengleichungen beträgt  $0.2^{\circ}\text{C}$ . Die aus den Extrema berechnete mittlere Saisonalität von instrumentell gemessener NCEP-SST und mittels Geradengleichung 15 berechneter Sr/Ca-SST stimmt für das Ningaloo Reef mit  $4.6^{\circ}\text{C}$  ( $23.3^{\circ}\text{C} - 27.9^{\circ}\text{C}$ ) bzw.  $4.1^{\circ}\text{C}$  ( $23.4^{\circ}\text{C} - 27.6^{\circ}\text{C}$ ) sehr gut überein. Dies gilt ebenfalls für die Abrolhos-Koralle. Für den untersuchten Zeitraum beträgt hier die Saisonalität der NCEP-SST  $4.5^{\circ}\text{C}$  ( $20.1^{\circ}\text{C} - 24.6^{\circ}\text{C}$ ), die der Sr/Ca-SST  $5.1^{\circ}\text{C}$  ( $19.8^{\circ}\text{C} - 24.9^{\circ}\text{C}$ ) (Tabelle 7). Diese Übereinstimmung ist ein Hinweis auf die gute Interpolation der NCEP-SST-Daten auf die Probenlokationen, obwohl aufgrund des Einflusses des ca. 30 bis 70 km breiten Leeuwin-Stromes höhere lokale Abweichungen erwartet werden könnten. Die absoluten mittleren Abweichungen der Sr/Ca- von der NCEP-SST sind in Tabelle 8 aufgeführt.

**Tabelle 7** Vergleich von Minima- und Maxima-SST [°C] sowie der Saisonalität [°C] zwischen den NCEP- und Sr/Ca-SST-Datensätzen der untersuchten Kernabschnitte (Erläuterungen siehe Tabelle 4).

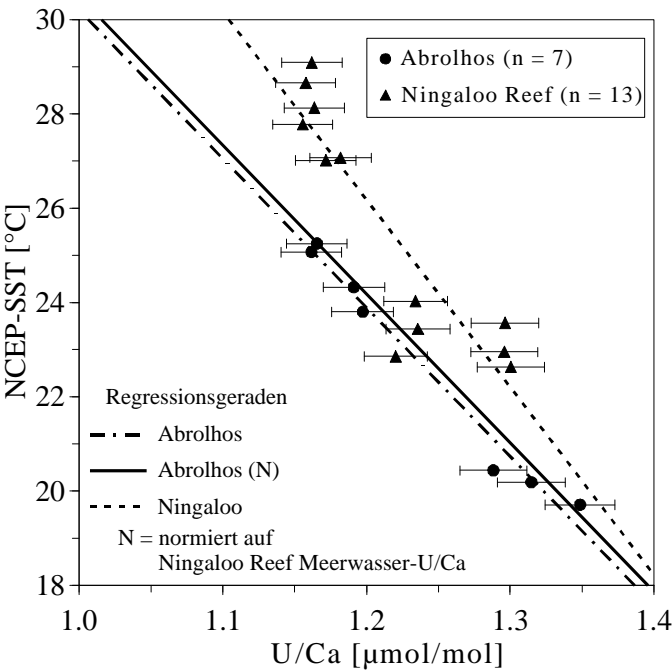
	Min		Max		Saisonalität	
	NCEP	Sr/Ca	NCEP	Sr/Ca	NCEP	Sr/Ca
Abrolhos	20.1	19.8	24.6	24.9	4.5	5.1
Ningaloo	23.3	23.4	27.9	27.6	4.6	4.1

**Tabelle 8** Absolute mittlere Temperaturabweichungen [°C] zwischen mittels Geradengleichung 15 berechneter Sr/Ca-SST und gemessener NCEP-SST (Erläuterungen siehe Tabelle 5). Die Differenz von -0.0062 mmol/mol aus den Sr/Ca-Meerwasserverhältnissen zwischen Abrolhos- und Ningaloo-Meerwasser wurde zu den Sr/Ca-Verhältnissen der Abrolhos-Koralle addiert.

<b>Abrolhos</b>	T-Max	T-Min	T-MinMax	restliche	gesamt
Gleichung MinMax	0.27	0.58	0.40	0.82	0.73
Gleichung Gesamt	0.26	0.59	0.40	0.84	0.74
<b>Ningaloo</b>	T-Max	T-Min	T-MinMax	restliche	gesamt
Gleichung MinMax	0.52	0.54	0.53	0.58	0.57
Gleichung Gesamt	0.48	0.56	0.53	0.61	0.58

5.4.2 U/Ca-SST-Beziehung

In Abb. 14a sind die U/Ca-SST-Regressionsgeraden für beide Lokaltäten und die sich daraus ergebende mittlere Gerade dargestellt. An den untersuchten rezenten Korallen-Kernen wurden zumeist nur an den Proben mit saisonalen Sr/Ca-Extremwerten U-Messungen durchgeführt (Abb. 12).



**Abb. 14** SST vs. U/Ca-Verhältnis beider rezenten Korallen. Auffällig ist die stärkere Streuung der Daten des Ningaloo Reefs ( $r = -0.87$ ) gegenüber denen der Abrolhos Koralle ( $r = -0.99$ ).

Die Geradengleichungen basieren auf U/Ca- bzw. SST-Extremwerten, normiert wurde auf das U/Ca-Verhältnis des Ningaloo Reef Meerwassers. Die Regressionsgeraden für beide Lokalitäten unterscheiden sich signifikant voneinander:

$$\text{SST } [^{\circ}\text{C}] = 62.07 - 31.575 \cdot \text{U/Ca } [\mu\text{mol/mol}] \quad (\text{Abrolhos Island}) \quad (16)$$

$$\text{SST } [^{\circ}\text{C}] = 73.94 - 39.794 \cdot \text{U/Ca } [\mu\text{mol/mol}] \quad (\text{Ningaloo Reef}) \quad (17)$$

$$\text{SST } [^{\circ}\text{C}] = 68.00 - 35.68 \cdot \text{U/Ca } [\mu\text{mol/mol}] \quad (\text{Abrolhos + Ningaloo}) \quad (18)$$

Im Bereich von 20 bis 30°C beträgt die mittlere bzw. maximale Temperaturabweichung zwischen der Abrolhos- und Ningaloo-Geraden 1.9 bzw. 2.9°C. Bei Durchführung der Meerwasserkorrektur, wie für Sr/Ca beschrieben, verringert sich die Abweichung um 0.3°C<sup>2</sup>. Dies bedeutet, daß die Abweichungen zwischen den Regressionsgeraden nicht durch unterschiedliche U/Ca-Meerwasserverhältnisse erklärt werden können, sondern andere Ursachen haben müssen.

Bei Verwendung der jeweiligen Geradengleichungen 16 bzw. 17 tritt zwischen der aus NCEP- und Sr/Ca-SST ermittelten Saisonalität eine Abweichung von 0.1°C (Abrolhos) und 0.8°C (Ningaloo) auf. (Tabelle 9).

**Tabelle 9** Vergleich von Minima- und Maxima- SST sowie der Saisonalität zwischen den NCEP- und U/Ca-SST-Datensätzen der untersuchten Kernabschnitte. Da hauptsächlich nur an Extremwerten U gemessen wurde, sind hier im Gegensatz zu Sr/Ca die mittleren SST's lediglich aus den Extremwerten berechnet.

	Min		Max		Saisonalität	
	NCEP	U/Ca	NCEP	U/Ca	NCEP	U/Ca
Abrolhos	20.1	20.2	24.6	24.6	4.5	4.4
Ningaloo	23.2	23.6	28.0	27.6	4.7	3.9

In Tabelle 10 sind für jeden Kern die absoluten Unterschiede zwischen NCEP-SST und der aus den U/Ca-Verhältnissen mit Hilfe der jeweiligen Geradengleichungen berechneten SST (U/Ca) aufgeführt.

**Tabelle 10** Absolute mittlere Temperaturabweichungen [°C] zwischen mittels Geradengleichung 16 bzw. 17 berechneter U/Ca-SST und gemessener NCEP-SST.

	T-Max	T-Min	T-MinMax
Abrolhos	0.16	0.42	0.27
Ningaloo	0.55	1.15	0.85

<sup>2</sup> Die U/Ca-Meerwasserverhältnisse für Abrolhos und Ningaloo betragen 1.364 bzw. 1.355  $\mu\text{mol/mol}$ . Da der Unterschied zwischen beiden Verhältnissen bei 0.7% liegt, der interne Meßfehler bei ca. 0.5%, kann hier auf eine Meerwasserkorrektur verzichtet werden.

## 6 Vergleich der Untersuchungsgebiete

### 6.1 Sr/Ca- und U/Ca-Verhältnis im Meerwasser

Die Elemente Ca, Sr und U gehören zu der Gruppe der konservativen Spurenstoffe im Ozean. Aufgrund ihrer relativ großen Verweilzeiten gegenüber der Tiefenwasserzirkulation (siehe Kapitel 2.1) sind ihre Konzentrationen räumlich und zeitlich homogen verteilt, so daß entsprechend den Verweilzeiten auch von einer räumlichen und zeitlichen Konstanz des Sr/Ca- bzw. U/Ca-Verhältnisses im Meerwasser ausgegangen werden kann. Untersucht werden muß, inwieweit eventuelle Schwankungen der Elementverhältnisse im Meerwasser die Anwendung des Sr/Ca- oder U/Ca-SST-Thermometers einschränken können.

In Tabelle 11 sind Sr/Ca-Verhältnisse im Meerwasser von Korallenriffen verschiedener Lokalitäten zusammengestellt.

**Tabelle 11** Weltweite Sr/Ca-Verhältnisse in Korallenriff-Meerwässern. Anzahl stellt die Menge der untersuchten Meerwasserproben dar. Bei den mit "\*" gekennzeichneten Sr/Ca-Verhältnissen wurden die Proben ungefiltert gemessen, die anderen Proben wurden mit 0.45µm Membranen gefiltert.

Lokalität	Autor	Sr/Ca [mmol/mol]	Anzahl [n]
Galapagos Islands	de Villiers et al. (1995)	8.5855 *	1
Golf von Kalifornien	de Villiers et al. (1995)	8.5457 *	1
Hawaii	de Villiers et al. (1995)	8.5095 *	5
Abaiang (W-Pazifik)	de Villiers et al. (1995)	8.5461 *	1
Okinawa (NE-Pazifik)	de Villiers et al. (1995)	8.5116 *	1
Barbados (Karibik)	de Villiers et al. (1995)	8.5469 *	1
Kenting (NE-Pazifik)	Shen et al. (1996)	8.5514 ± 0.0204 (2σ)	12
Neu-Kaledonien (W-Pazifik)	Beck et al. (1995, pers. commun.) aus Shen et al. (1996)	8.4641	2
Great Barrier Reef	Alibert & McCulloch (1997)	8.514 *	1
La Réunion (W-Indik)	diese Arbeit	8.5710	2
Abrolhos Island (E-Indik)	diese Arbeit	8.5797	1
Ningaloo Reef (E-Indik)	diese Arbeit	8.5734	1
<b>Mittelwert</b>		8.5416 ± 0.0686 (2σ)	

Um die gelöste von der partikulären Phase zu trennen, wurden die in dieser Arbeit gemessenen Meerwasserproben mit 0.45 µm-Membranen gefiltert (Goldberg et al., 1952). Es ist unklar, ob die gefilterte oder ungefilterte Probe das Meerwasser am besten repräsentiert, aus dem die Koralle Ca und Sr aufnimmt. In dieser Arbeit wird jedoch davon ausgegangen, daß die gelöste Fraktion den Haupteinfluß besitzt. In Tabelle 12 sind die Sr/Ca-Werte der gefilterten sowie ungefilterten Proben aufgeführt.

**Tabelle 12** Sr/Ca-Verhältnisse [mmol/mol] im gefilterten und ungefilterten Meerwasser der untersuchten Probenstandorte.

	St. Gilles (Réunion)	Cap La Houssaye (Réunion)	Ningaloo Reef	Abrolhos Islands
gefiltert	8.5716	8.5703	8.5797	8.5734
ungefiltert	8.5679	8.5695	8.5734	8.5581
gef. – ungef.	0.004 (0.04%)	0.001 (0.01%)	0.006 (0.07%)	0.015 (0.18%)

Lediglich die Abrolhos-Probe weist gegenüber den anderen Proben eine höhere Abweichung auf. Im Mittel liegen die Sr/Ca-Verhältnisse der ungefilterten Proben nur 0.0065 mmol/mol niedriger als die gefilterten. Bei Shen et al. (1996) weist das ungefilterte Meerwasser gegenüber dem gefilterten ein um 0.0057 mmol/mol höheres Sr/Ca-Verhältnis auf. Auch de Villiers et al. (1994) können keine signifikanten Unterschiede zwischen gefilterten und ungefilterten sowie zwischen angesäuerten und nicht angesäuerten Proben feststellen.

Die Spanne der aus Tabelle 11 aufgeführten Meerwasser-Sr/Ca-Verhältnisse beträgt 8.4641 bis 8.5855 mmol/mol und variiert somit um 1.4%<sup>3</sup>. Mit der im Kap. 5.4.1 berechneten Geradengleichung 15 errechnen sich aus dieser Spanne SST-Unterschiede von maximal 2.3°C. Es muß hierbei jedoch in Betracht gezogen werden, daß an einigen der untersuchten Lokalitäten (Galapagos Islands und Golf von Kalifornien) stärkere Sr/Ca-Variationen infolge "upwelling" auftreten. Analysenfehler aufgrund unterschiedlicher Probenahmetechnik sind ebenfalls denkbar. Zudem wurden die Messungen von verschiedenen Laboren durchgeführt. Die Richtigkeit der Meßwerte sollte durch die Verwendung geeigneter Standards überprüft werden. Ein Teil der Sr/Ca-Variationen kann also auf laborspezifischen Fehlern beruhen. Im globalen Maßstab muß vorerst aus den Ergebnissen in Tabelle 11 vermutet werden, daß für die SST-Bestimmung aus Sr/Ca-Verhältnissen in Korallen keine ausreichende Konstanz der Meerwasserkonzentrationen gegeben ist. Wie u.a. im Kapitel 6.2 gezeigt wird, bringt eine Korrektur der Korallen-Sr/Ca-Verhältnisse auf das Meerwasser-Sr/Ca-Verhältnis eine bessere Übereinstimmung der Geradengleichungen unterschiedlicher Lokalitäten. Besonders in "upwelling"-Gebieten kann das Sr/Ca-Verhältnis des Oberflächenwassers stark schwanken und somit die Korrektur des Korallen-Sr/Ca-Verhältnisses beeinträchtigt werden.

Kleinräumig scheinen Riff-Meerwässer nur sehr geringe Sr/Ca-Variationen aufzuweisen. Bei de Villiers et al. (1994) zeigen Wasserproben von drei verschiedenen Rifflokalitäten der Hawaii-Inseln lediglich Sr/Ca-Variationen, die bezogen auf die SST  $\pm 0.05^\circ\text{C}$  ausmachen. Aber auch weiträumiger, bezogen auf unsere 3 Lokalitäten im Indischen Ozean variiert das Sr/Ca-Verhältnis um nur 0.1%. Dies entspricht einem SST-Unterschied von ca.  $0.2^\circ\text{C}$ . Wie hoch die zeitlichen Unterschiede im Sr/Ca- bzw. U/Ca-Verhältnis seit dem letzten glazialen

<sup>3</sup> Alle angegebenen prozentualen Variationen (bzw. Abweichungen oder Unterschiede) sind maximale Variationen. Sie errechnen sich aus Maximalwert durch Minimalwert minus 1 mal 100.

Maximum oder dem letzten Interglazial waren, bleibt hinsichtlich der Bestimmung von Paläotemperaturen eine wichtige offene Frage.

In Tabelle 13 sind U/Ca-Verhältnisse im Meerwasser von Korallenriffen verschiedener Lokalitäten zusammengestellt.

**Tabelle 13** U/Ca-Verhältnisse in Korallenriff-Meerwässern. Anzahl stellt die Menge der untersuchten Meerwasserproben dar. Die Probe von Shen & Dunbar (1995) wurde mit 0.4µm, unsere Proben mit 0.45µm-Membranen gefiltert.

Lokalität	Autor	U/Ca [µmol/mol]	Anzahl [n]
Galapagos Islands (E-Pazifik)	Shen & Dunbar (1995)	1.28	1
La Réunion (W-Indik)	diese Arbeit	1.34	2
Abrolhos Island (E-Indik)	diese Arbeit	1.35	1
Ningaloo Reef (E-Indik)	diese Arbeit	1.36	1
<b>Mittelwert</b>		1.33 ± 0.026 (2σ)	

Die Variationen von U/Ca betragen ca. 6.3%. Mit der im Kap. 6.3 berechneten Geradengleichung 17 des Ningaloo Reefs, die die größte Steigung besitzt (Tabelle 18), errechnen sich aus dieser Spanne SST-Unterschiede von maximal 3.2°C. Bezogen auf unsere 3 Lokalitäten im Indischen Ozean variiert das U/Ca-Verhältnis des gefilterten Meerwassers um 1.5%, entsprechend einem SST-Unterschied von 0.8°C. Im ungefilterten Meerwasser unterscheiden sich die U/Ca-Verhältnisse um maximal 20%. Innerhalb einer Probenlokation zeigen die ungefilterten Proben gegenüber den gefilterten bis zu 9% Abweichungen (Tabelle 14).

**Tabelle 14** U/Ca-Verhältnisse [µmol/mol] im gefilterten und ungefilterten Meerwasser der untersuchten Probenstandorte.

	St. Gilles (Réunion)	Cap La Houssaye (Réunion)	Ningaloo Reef	Abrolhos Islands
gefiltert	1.335	1.343	1.364	1.355
ungefiltert	1.358	1.245	1.357	1.495
gef. – ungef.	-0.023 (-1.7%)	0.098 (7.8%)	0.007 (0.5%)	-0.140 (-9.4%)

Studien an Korallenkulturen (Swart & Hubbard, 1982) deuten darauf hin, daß nicht das U/Ca-Meerwasserverhältnis, sondern die Absolutkonzentration von gelöstem U das Verhältnis dieser Elemente im Korallenskelett bestimmt. U-Konzentrationen können im Oberflächenwasser Schwankungen unterliegen. Starke Regenfälle verursachen eine Mischungsschicht von einigen 10-er Metern, in der die U-Konzentration um ca. 10% gesenkt werden kann (Lukas & Lindstrom, 1991). Flußwasser besitzt im Mittel nur ca. 6% der im Meerwasser gelösten U-Konzentration (Palmer & Edmond, 1993). Die Untersuchungen von Shen & Dunbar (1995) zeigen, daß diese Änderungen der U-Meerwasserkonzentrationen im U/Ca-Verhältnis von Korallen reflektiert werden. So weisen Korallen an Standorten mit einer jährlichen SST-Saisonalität von 1-2°C Variationen von bis zu 15% im U/Ca-Verhältnis auf, die nicht allein



durch die geringen Temperaturänderungen verursacht werden können. Shen & Dunbar (1995) folgern daraus, daß die U/Ca-Verhältnisse in Korallen Salinitätsschwankungen unterliegen, die durch bedeutende Regenfälle oder Süßwassereintrag an Flußmündungen hervorgerufen werden. U/Ca-Verhältnisse könnten somit, ähnlich  $\delta^{18}\text{O}$ -Werten, zur Rekonstruktion von Niederschlägen verwendet werden. Bei der Verwendung als SST-Proxy müssen die regionalen Gegebenheiten beachtet werden.

Möglicherweise tragen die unterschiedlichen Niederschlagsraten an den Lokationen Abrolhos Island und Ningaloo Reef zu den Abweichungen der U/Ca-Regressionsgeraden bei (siehe Abb. 14). Der Niederschlag an der Lokation Abrolhos Island ist gegenüber Ningaloo Reef etwa um den Faktor 2 höher (Abrolhos: 38 mm/a), Ningaloo: 20 mm/a). Aufgrund dessen sollte am Ningaloo Reef eine höhere Salinität gegenüber der Lokation Abrolhos Island vorliegen. Aufgrund der Dichtestruktur des Indischen Ozeans (Batteen & Rutherford, 1990) ist jedoch das Gegenteil der Fall. Am Ningaloo Reef wird der Leeuwinstrom vorwiegend über den Nordwest Schelf mit tropischem, niedrigsalinarem Wasser (<34.5‰) aus dem Pazifischen Ozean gespeist. Weiter südlich nimmt der Einfluß von hochsalinarem subtropischem Wasser (ca. 35.8‰) aus dem Indischen Ozean zu. Bei einer Korrektur der in Abb. 14 dargestellten Regressionsgeraden auf die U-Konzentration des Meerwassers der jeweiligen Lokalitäten würden jedoch auch noch die auf 35‰ Salinität normierten U-Konzentrationen (Abrolhos: 3.22 µg/g, Ningaloo: 3.17 µg/g) den Abstand zwischen den Geraden vergrößern. Jedoch gestatten diese zu unterschiedlichen Zeiten genommenen zwei Proben keine definitiven Aussagen über die saisonalen und mittleren U-Konzentrationen an den Lokationen.

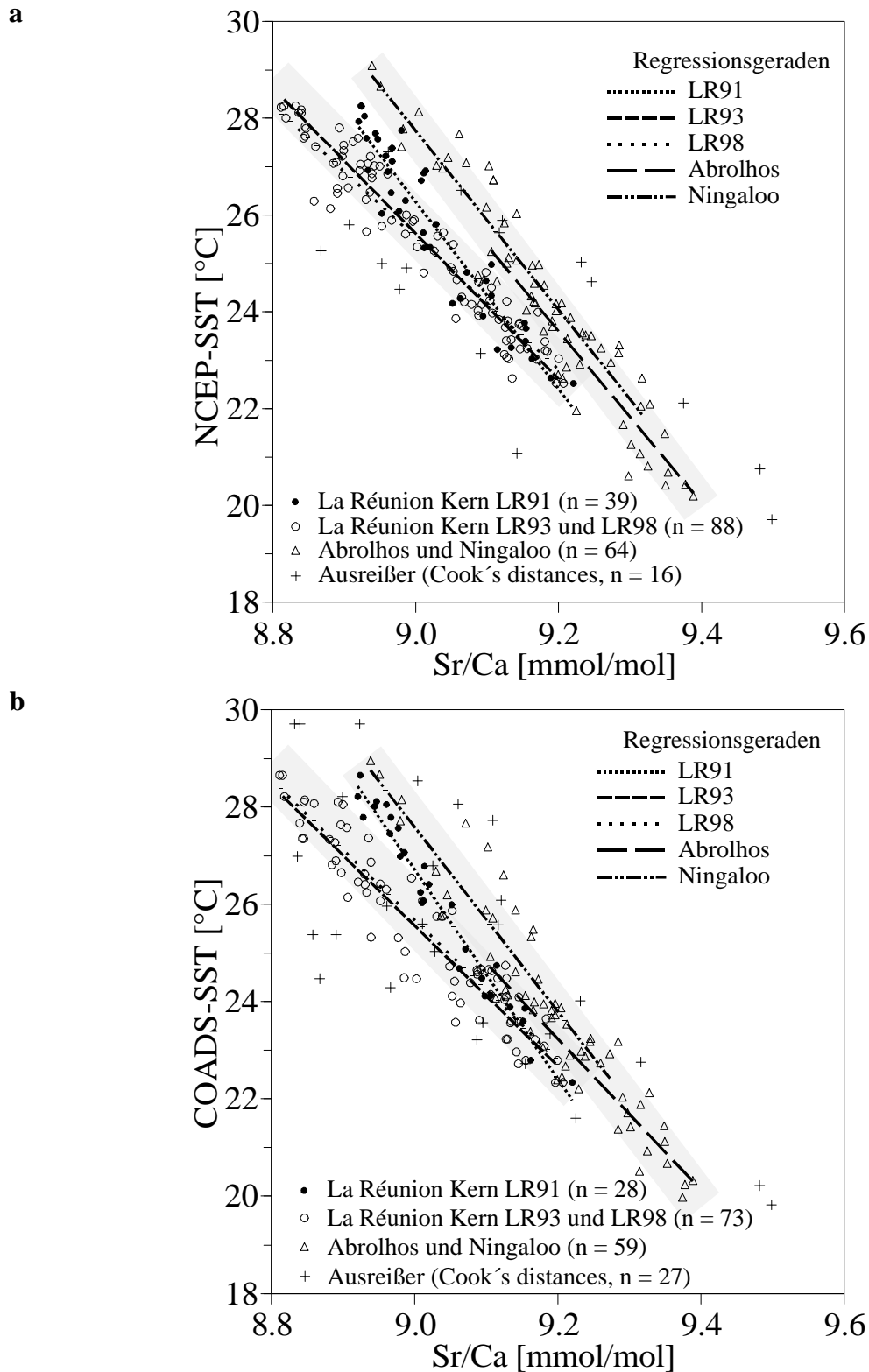
**Tabelle 15** U-Konzentrationen [µg/kg] im gefilterten und ungefilterten Meerwasser der untersuchten Probenstandorte. Die fett gedruckten Werte sind auf 35‰ Salinität normiert. Die jährlichen Mittelwerte der Salinität für die Probenlokationen stammen aus dem World Ocean Atlas ([http://www.ferret.noaa.gov/fbin/climate\\_server](http://www.ferret.noaa.gov/fbin/climate_server)).

	St. Gilles (Réunion)		Cap La Houssaye (Réunion)		Ningaloo Reef		Abrolhos Islands	
Salinität [‰]	35.09		35.09		35.07		35.47	
gefiltert	3.18	<b>3.18</b>	3.19	<b>3.18</b>	3.18	<b>3.17</b>	3.26	<b>3.22</b>
ungefiltert	3.22	<b>3.22</b>	3.06	<b>3.05</b>	3.23	<b>3.22</b>	3.61	<b>3.56</b>
gef. – ungef.	-1.24%		4.12%		-1.64%		-9.69%	

Die U-Konzentrationen des gefilterten Meerwassers variieren um 2.6%, des ungefilterten Meerwassers um 18%. Auf 35‰ Salinität normiert verringert sich der maximale Unterschied zwischen den gefilterten Wasserproben auf 0.7%, zwischen den ungefilterten Proben auf 16%. Die ungefilterten Proben zeigen gegenüber den gefilterten bis zu 9.7% Abweichungen (Tabelle 15) und weisen damit auf eine z.T. stark variierende U-Konzentration in der partikulären Fracht hin.

## 6.2 Sr/Ca-SST-Beziehung

Maßgeblichen Einfluß auf die Sr/Ca-SST-Geradengleichung hat der verwendete SST-Datensatz. Da Langzeitmessungen direkt an der Probenlokation noch selten sind, muß auf



**Abb. 15** Vergleich der aus jeweils allen Datenpunkten berechneten Sr/Ca-SST-Regressionsgeraden der fünf untersuchten rezenten Korallen. In (a) wurden NCEP-SST, in (b) COADS-SST verwendet.

SST-Messungen naheliegender Meßstationen oder auf COADS- bzw. NCEP-SST zurückgegriffen werden. Abweichungen von der exakten SST können durch kleinräumige Temperaturschwankungen an der Probenlokation auftreten, wie beispielsweise an den Abrolhos-Inlands durch den dort besonders stark mäandrierenden Leeuwin-Strom (siehe Abb. 12a).

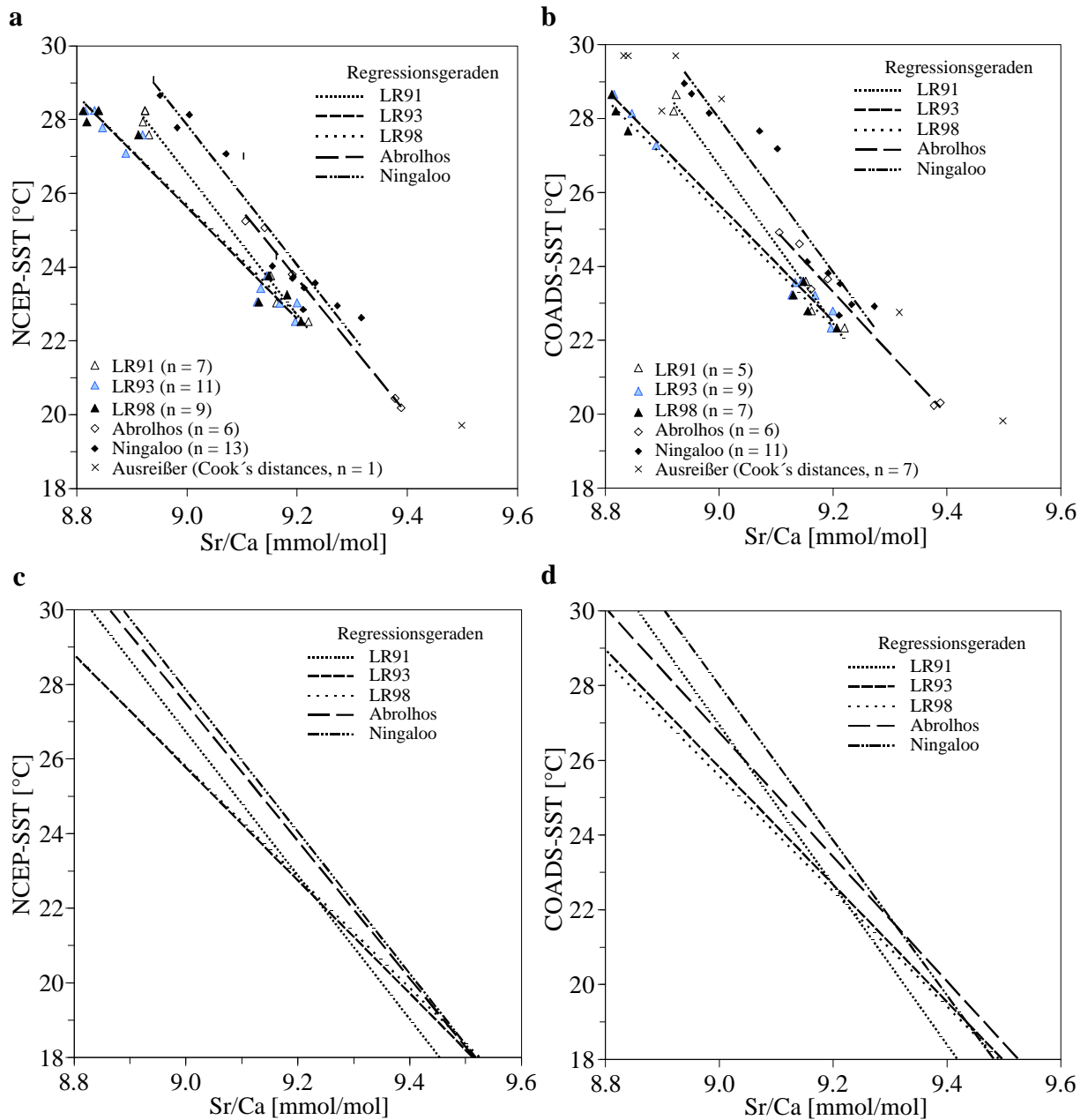
Die Unterschiede zwischen monatlicher COADS- und NCEP-SST an den drei untersuchten Probenlokationen betragen im Mittel unter  $0.5^{\circ}\text{C}$ , maximal  $1.5^{\circ}\text{C}$ . Die mit Hilfe beider SST-Datensätze und allen Sr/Ca-Daten berechneten Sr/Ca-Regressionsgeraden zeigt Abb. 15.

Bei Verwendung der NCEP-SST weisen die an der Westaustralischen Küste untersuchten Korallen der Lokationen Abrolhos Island und Ningaloo Reef in ihren Geraden etwa gleiche Steigungen auf. Durch Verwendung der COADS-SST ändert sich die Steigung der Abrolhos-Geraden deutlich, so daß sich die Übereinstimmung beider Geraden verschlechtert. Im Bezug zu den Geraden LR93 und LR98 unterscheidet sich die Regressionsgerade LR91 ebenfalls stärker in ihrer Steigung als dies bei Verwendung der NCEP-SST der Fall ist.

Eine Optimierung der Geradengleichungen wird, wie auch bei der getrennten Betrachtung der Korallen des West- und Ostindik, durch die ausschließliche Verwendung der Extremwerte erreicht (Abb. 16a/b). Beim Vergleich der drei Untersuchungsgebiete kann eine weitere Optimierung durch die Korrektur auf das jeweilige an der Probenlokation vorherrschende Meerwasser-Sr/Ca-Verhältnis (Abb. 16c/d) erreicht werden. Aufgrund der besseren Übereinstimmung der Geradengleichungen der untersuchten Korallen, wurde der NCEP-Datensatz für Berechnung der Sr/Ca-SST zugrunde gelegt. Für diesen Datensatz spricht auch die geringere Anzahl der ermittelten Ausreißer (Abb. 15 und Abb. 16a/b). Die Geraden LR93 und LR98 der Lokalität La Réunion sowie Abrolhos Island und Ningaloo Reef können, wie schon in den vorherigen Kapiteln, jeweils zu mittleren Geradengleichungen zusammengefaßt werden. In Tabelle 16 sind alle Geradengleichungen der Regressionsgeraden aus Abb. 16c und die mittleren Geradengleichungen aufgeführt, wobei auf das Sr/Ca-Meerwasserverhältnis des Ningaloo-Reefs normiert wurde.

**Tabelle 16** Auf das Sr/Ca-Verhältnis des Ningaloo Reef-Meerwassers normierte Sr/Ca-SST-Geradengleichungen.

$\text{SST } [^{\circ}\text{C}] = 199.91 - 19.242 \cdot \text{Sr/Ca [mmol/mol]}$	(LR91)	(19)
$\text{SST } [^{\circ}\text{C}] = 162.05 - 15.142 \cdot \text{Sr/Ca [mmol/mol]}$	(LR93)	(20)
$\text{SST } [^{\circ}\text{C}] = 159.66 - 14.873 \cdot \text{Sr/Ca [mmol/mol]}$	(LR98)	(21)
<b><math>\text{SST } [^{\circ}\text{C}] = 160.86 - 15.008 \cdot \text{Sr/Ca [mmol/mol]}</math></b>	<b>(LR93 + LR98)</b>	<b>(22)</b>
$\text{SST } [^{\circ}\text{C}] = 193.23 - 18.415 \cdot \text{Sr/Ca [mmol/mol]}$	(Abrolhos Island)	(14)
$\text{SST } [^{\circ}\text{C}] = 199.07 - 19.023 \cdot \text{Sr/Ca [mmol/mol]}$	(Ningaloo Reef)	(12)
<b><math>\text{SST } [^{\circ}\text{C}] = 196.15 - 18.719 \cdot \text{Sr/Ca [mmol/mol]}</math></b>	<b>(Abrolhos + Ningaloo)</b>	<b>(15)</b>



**Abb. 16** Vergleich der Sr/Ca-SST-Regressionsgeraden aller untersuchten rezenten Korallenkerne. Auf der linken Seite wurden NCEP-SST's verwendet, auf der rechten Seite COADS-SST's. In (a) und (b) wurden die Regressionsgeraden mit Hilfe der Extremwerte des jeweiligen Kerns berechnet. In (c) und (d) wurden diese Regressionsgeraden auf das Ningaloo Reef-Meerwasser normiert.

Die maximalen SST-Unterschiede, die sich bei der Anwendung der fünf Geradengleichungen ergeben, betragen ca. 2.3°C. Dies ist bei niedrigen, etwa 30°C entsprechenden Sr/Ca-Verhältnissen und der Anwendung der mittleren Geradengleichung 12 bzw. 22 der Fall.

SST-Minima um die 20°C können hingegen mit höherer statistischer Genauigkeit rekonstruiert werden. Hier betragen die maximalen SST-Unterschiede zwischen allen fünf Geraden nur ca. 0.9°C (berechnet mit Gleichung 12 bzw. 19).

Hinsichtlich der Steigungen stimmen die Regressionsgeraden der West-Indik-Korallen von Abrolhos Island und Ningaloo Reef sowie der Ost-Indik-Koralle LR91 von La Réunion

(Gleichungen 14, 12 und 19) innerhalb 4.5% überein (Abb. 16a). Diese 3 untersuchten Korallen weisen auch z.T. stärkere Wachstumsunterschiede von durchschnittlich 10, 3 und 5 mm zwischen halbjährlichen Wachstumsabschnitten auf (Tabelle 3, Tabelle 6).

Im Kapitel 4.2.1 wurde anhand der drei bei La Réunion untersuchten Korallen eine positive Korrelation zwischen Zuwachsrate und Sr/Ca-Verhältnis festgestellt. Aufgrund der gleichen Lokation konnten viele Einflußgrößen, die sich ebenfalls auf das Sr/Ca-Verhältnis in der Koralle auswirken könnten, vernachlässigt werden. Auch wenn diese optimale Voraussetzung bei Hinzunahme der vom Ningaloo Reef und von den Abrolhos Islands stammenden Korallen nicht mehr gegeben ist, läßt sich doch eine grundsätzliche Übereinstimmung der gefundenen positiven Korrelation von Sr/Ca-Verhältnis und Zuwachsrate feststellen. Die Herbst- und Frühjahrszuwachsraten der Abrolhos-Koralle sind mit 18 bzw. 14 mm/a (Tabelle 6) höher als bei den La Réunion-Korallen (Tabelle 3). Gleichfalls ist die Sr/Ca-SST-Regressionsgerade der Abrolhos Koralle bei gegebener SST zu höheren Sr/Ca-Verhältnissen verschoben (Abb. 16a). Ähnliches gilt für die Ningaloo-Koralle: Die mittlere Herbstzuwachsrate von 14 mm/a und die Sr/Ca-Maxima bei gegebener SST sind ebenfalls höher als bei den La Réunion Korallen. Das mittlere Frühjahrswachstum von 11 mm/a entspricht jedoch dem der Koralle LR91 von La Réunion. Trotzdem liegen die Sr/Ca-Minima bei gegebener SST höher als bei den Sr/Ca-Minima des LR91-Kerns (Abb. 16a). In diesem Fall liegt keine positive Korrelation zwischen Sr/Ca-Verhältnis und Wachstumsrate vor. Da der Leeuwin-Strom an der Westaustralischen Küste in den Sommermonaten (Dezember bis Januar) schwächer ist, kommt es während dieser Zeit zu "upwelling"-Prozessen (Pattiaratchi & Buchan, 1991). Diese können dann zu mehr wechselhaften und generell höheren Sr/Ca-Verhältnissen in Korallen führen (de Villiers et al., 1995). Bezogen auf unsere Ningaloo- und Abrolhos-Koralle könnte diese Tatsache zu höheren Sr/Ca-Verhältnissen, besonders an den Sr/Ca-Minima geführt haben. Die im Kapitel 4.2.1 beschriebene Korrelation sollte jedoch besser an weiteren Korallen der Lokation La Réunion überprüft werden, um somit die äußeren Bedingungen zum großen Teil vernachlässigen zu können.

Nach dem Vergleich der in dieser Arbeit berechneten Geradengleichungen sollen diese nun mit Literaturdaten verglichen werden. Die Vergleichbarkeit der Regressionsgeraden hängt dabei stark von Differenzen der Sr/Ca-Meerwasserverhältnisse, den zur Kalibration verwendeten SST-Datensätzen und der Methode zur Berechnung der Regressionsgeraden ab. Hinzu kommen laborspezifische Unterschiede, wie z.B. verschiedene Analysenverfahren, Spikes und Standards, die zusätzliche Abweichungen hervorrufen können. Quantitative Vergleiche der Literatur-Regressionsgeraden erfolgen mit der in dieser Arbeit berechneten Geradengleichung 15 (mittlere Gerade aus Ningaloo Reef- und Abrolhos Island-Gerade).

Die Meerwasserkonzentrationen an den Lokalitäten der verglichenen Korallen schwanken von 8.464 bis 8.586 mmol/mol bzw. 0.68% um den Mittelwert von 8.522 mmol/mol. Bei

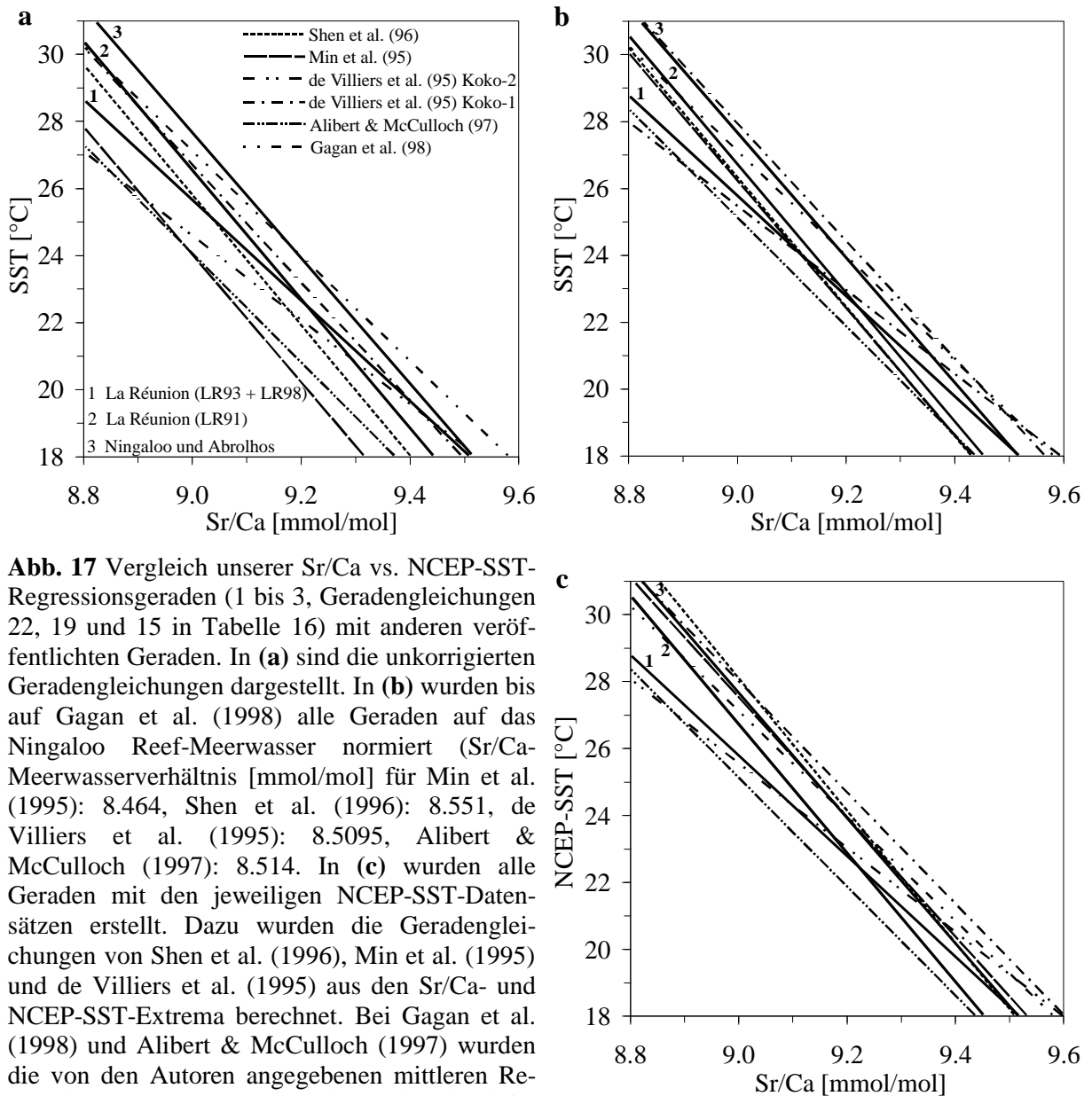
Anwendung unserer mittleren Geradengleichung 15 sind dies auf die SST bezogen ca.  $\pm 1.1^{\circ}\text{C}$ . Bis auf die Gerade von Gagan et al. (1998) wurden alle verglichenen Geraden auf das Sr/Ca-Meerwasserverhältnis des Ningaloo Reefs normiert (Abb. 17b). Falls noch nicht geschehen, wurden die veröffentlichten Geradengleichungen mit den entsprechenden NCEP-SST's neu berechnet, wobei lediglich die saisonalen Extremwerte verwendet wurden (Abb. 17c).

Signifikant unterscheiden sich die aus den Sr/Ca-Extremwerten von Min et al. (1995) berechneten Sr/Ca-SST-Geradengleichungen bei Anwendung verschiedener SST-Datensätze. Die von Min et al. (1995) verwendeten SST-Daten einer nahe der Probenlokation Amedee Lighthouse, Noumea, New Caledonia gelegenen Meßstation erzeugen eine Geradengleichung, die zu unserer Geradengleichung 15 einen auf die Temperatur bezogenen Achsenabschnitt von ca.  $-3.6^{\circ}\text{C}$  besitzt (Abb. 17a). Die Normierung auf das Meerwasser-Sr/Ca-Verhältnis des Ningaloo Reefs verringert den Unterschied im Achsenabschnitt auf ca.  $-1.5^{\circ}\text{C}$  (Abb. 17b). Bei Einsatz des NCEP-SST-Datensatzes ( $22^{\circ}3'S$ ;  $166^{\circ}2'E$ ) minimieren sich die SST-Abweichungen zwischen beiden Geraden auf nur ca.  $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$  (Abb. 17c).

Bei der Geradengleichung von Shen et al. (1996) tritt ein ganz ähnliches Ergebnis auf (NCEP-SST-Daten von  $21^{\circ}5'N$ ;  $120^{\circ}4'E$ ). Die maximale und mittlere SST-Abweichung im Bereich von  $20$  bis  $30^{\circ}\text{C}$  beträgt  $-2.1$  bis  $-1.7^{\circ}\text{C}$  in Bezug auf unsere Geradengleichung 15. Die Meerwasser-Sr/Ca-Normierung verringert den Unterschied im Achsenabschnitt auf  $-1.6^{\circ}\text{C}$  bis  $-1.2^{\circ}\text{C}$  (Abb. 17b). Durch die Verwendung des NCEP-SST-Datensatzes ( $22^{\circ}3'S$ ;  $166^{\circ}2'E$ ) minimieren sich die Abweichungen zwischen beiden Geraden auf  $0$  bis  $0.5^{\circ}\text{C}$  (Abb. 17c). Der von den Autoren verwendete SST-Datensatz stammt von einem  $200\text{ m}$  entfernt liegenden SST-Sensor eines Kernkraftwerkes, der in einer  $48\text{ h}$ -Periode auf die Proben-Lokation kalibriert wurde. Eventuell ist die Abweichung zwischen beiden SST-Datensätzen, die ca.  $1.5^{\circ}\text{C}$  beträgt, auf die kurze Kalibrierzeit zurückzuführen. Als Fehlerquelle für zumindest einen Teil des auftretenden Achsenabschnittes könnten auch laborspezifische Unterschiede in Frage kommen.

Die aus drei *P. lutea*-Korallen verschiedener Lokalitäten berechnete Regressionsgerade von Gagan et al. (1998) weist mittlere SST-Abweichungen von  $-0.2^{\circ}\text{C}$  zu unserer Geradengleichung 15 auf. Aufgrund der unterschiedlichen Steigung liegen die im Bereich von  $20$  und  $30^{\circ}\text{C}$  auftretenden maximalen Abweichungen bei  $+0.7$  und  $-1^{\circ}\text{C}$ . Da keine Sr/Ca-Meerwasserverhältnisse der verschiedenen Lokalitäten vorliegen, ist die Vergleichbarkeit aufgrund der fehlenden Korrektur eingeschränkt.

Bei den Koko-1- und Koko-2-Geradengleichungen von de Villiers et al. (1994, 1995) betragen die maximalen und mittleren SST-Abweichung im Bereich von  $20$  bis  $30^{\circ}\text{C}$   $-0.5$  bis  $-1.1^{\circ}\text{C}$  bzw.  $-4.1$  bis  $-0.7^{\circ}\text{C}$  in Bezug auf unsere Geradengleichung 15 (Abb. 17a). Bei Nor-



**Abb. 17** Vergleich unserer Sr/Ca vs. NCEP-SST-Regressionsgeraden (1 bis 3, Geradengleichungen 22, 19 und 15 in Tabelle 16) mit anderen veröffentlichten Geraden. In (a) sind die unkorrigierten Geradengleichungen dargestellt. In (b) wurden bis auf Gagan et al. (1998) alle Geraden auf das Ningaloo Reef-Meerwasser normiert (Sr/Ca-Meerwasserverhältnis [mmol/mol] für Min et al. (1995): 8.464, Shen et al. (1996): 8.551, de Villiers et al. (1995): 8.5095, Alibert & McCulloch (1997): 8.514. In (c) wurden alle Geraden mit den jeweiligen NCEP-SST-Datensätzen erstellt. Dazu wurden die Geradengleichungen von Shen et al. (1996), Min et al. (1995) und de Villiers et al. (1995) aus den Sr/Ca- und NCEP-SST-Extrema berechnet. Bei Gagan et al. (1998) und Alibert & McCulloch (1997) wurden die von den Autoren angegebenen mittleren Regressionsgeraden verwendet, die bereits mit Hilfe der NCEP-SST berechnet wurden. Die Regressionsgeraden von Sinclair et al. (1998) und Mitsuguchi et al. (1996), bei denen die Sr/Ca-Verhältnisse mittels Laser-Ablations-ICP-MS und ICP-AES bestimmt wurden, sind hier aufgrund des höheren  $2\sigma$ -Analysenfehlers von auf die Temperatur bezogen  $2.6^{\circ}\text{C}$  bzw.  $1.6^{\circ}\text{C}$  nicht dargestellt.

mierung auf das Sr/Ca-Meerwasserverhältnis des Ningaloo Reefs ändern sich die Abweichungen auf  $0.8$  bis  $0.1^{\circ}\text{C}$  bzw.  $-3.2$  bis  $0.4^{\circ}\text{C}$ . Die mittleren SST-Abweichungen verringern sich bei beiden Geraden um  $0.4$  und  $1^{\circ}\text{C}$  (Abb. 17b). Bei Austausch der Meßstations-SST-Daten durch NCEP-SST-Daten ändern sich die Geradengleichungen von de Villiers et al. (1994, 1995) nicht signifikant (Abb. 17 b/c). Die Regressionsgerade der Koko-1-Koralle kann jedoch aufgrund der geringen Datenmenge als relativ unsicher eingeschätzt werden. Die mittlere und maximale SST-Abweichung im Bereich von  $20$  bis  $30^{\circ}\text{C}$  beträgt  $-0.6$  bzw.  $-1.2^{\circ}\text{C}$ . Bei der Koko-2-Koralle ist jedoch auch bei höherer statistischer Sicherheit kein anderer Verlauf der Geradengleichung zu erwarten. Hier können, wie von de Villiers et al.

(1995) beschrieben, andere Einflußgrößen auf das Sr/Ca-Verhältnis, wie z.B. unterschiedliche Wachstums- bzw. Kalzifizierungsraten (siehe Kap. 4.2.1) sowie Umweltfaktoren, die den Sr/Ca-Einbau in das Skelett direkt oder indirekt über den Stoffwechsel der Koralle beeinflussen können (siehe Kap. 2) und eventuell nur lokalen Einfluß besitzen, Anteil an diesen Abweichungen haben. In Bezug auf die Koko-2-Geradengleichung von de Villiers et al. (1995) ergeben sich aus diesen möglichen Einflußgrößen Temperaturunterschiede von durchschnittlich 1.3°C bis maximal 2.9°C zu unserer mittleren Geradengleichung 15. Die mittlere Geradengleichung von Alibert & McCulloch (1997) weist zwar eine der Hauptmenge der Geradengleichungen entsprechende Steigung auf, jedoch bewirkt der Achsenabschnitt SST-Abweichungen von ca. 2°C.

Bei Vernachlässigung der Koko-1-Geraden (de Villiers et al., 1995) kann nach den Ergebnissen in Abb. 17c eine maximale Abweichung der verglichenen Korrelationsgeraden von etwa 3°C über den SST-Bereich von 20 bis 30°C abgeschätzt werden. Für die Anwendung der Sr/Ca-Methode zur SST-Rekonstruktion sollte das Sr/Ca-Thermometer deshalb möglichst an der Probenlokation kalibriert werden, um lokale Einflußgrößen auf das Sr/Ca-Verhältnis der Koralle sowie laborspezifische Gegebenheiten mit einzubeziehen. Wie aus dem Beispiel der drei bei La Réunion untersuchten Korallen (Kap. 4.4.1) hervorgeht, können dadurch die mittleren und maximalen SST-Abweichungen zwischen einzelnen Geraden reduziert werden. Die mittlere SST-Abweichung der drei La Réunion-Korallen beträgt 0.7°C. Die maximale Abweichung erreicht ca. 2°C, wobei hier durch weitere Untersuchungen zur Quantifizierung des Einflusses der Wachstumsraten auf das Sr/Ca-Verhältnis im Korallen-Aragonit eine weitere Verbesserung erreicht werden könnte.

**Tabelle 17** Geradengleichungen der in Abb. 17c dargestellten Regressionsgeraden aus Literaturdaten.

$SST [^{\circ}C] = 177.50 - 16.610 \cdot Sr/Ca [mmol/mol]$	de Villiers et al. (1995) Koko-1	(23)
$SST [^{\circ}C] = 139.71 - 12.679 \cdot Sr/Ca [mmol/mol]$	de Villiers et al. (1995) Koko-2	(24)
$SST [^{\circ}C] = 188.43 - 17.877 \cdot Sr/Ca [mmol/mol]$	Min et al. (1995)	(25)
$SST [^{\circ}C] = 206.13 - 19.781 \cdot Sr/Ca [mmol/mol]$	Shen et al. (1996)	(26)
$SST [^{\circ}C] = 171.47 - 16.260 \cdot Sr/Ca [mmol/mol]$	Alibert & McCulloch (1997)	(27)
$SST [^{\circ}C] = 168.20 - 15.675 \cdot Sr/Ca [mmol/mol]$	Gagan et al. (1998)	(28)

### 6.3 U/Ca-SST-Beziehung

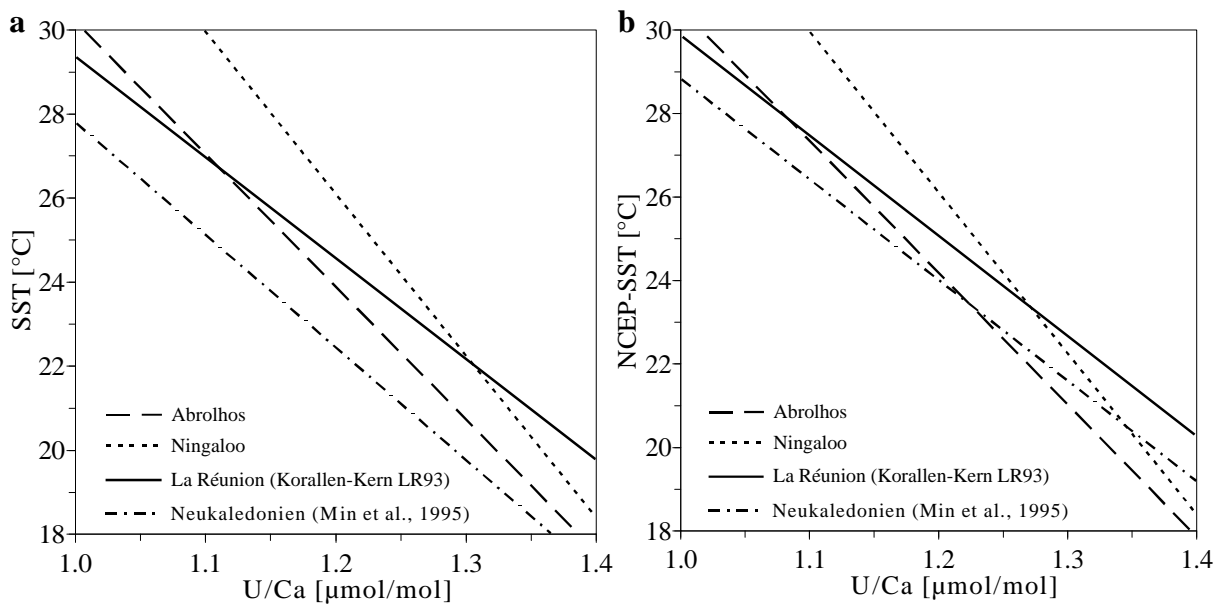
Die U/Ca-SST-Geradengleichungen der untersuchten Korallen von Abrolhos, Ningaloo und La Réunion (Kern LR93) weisen gegenüber den Sr/Ca-Geraden stärkere Abweichungen in der Steigung und im Achsenabschnitt auf. Bei 20°C betragen die maximalen Abweichungen der aus den U/Ca-Verhältnissen rekonstruierten SST's ca. 1.8°C, bei 30°C ca. 4°C. Nach der



Korrektur der drei Geradengleichungen auf das U/Ca-Verhältnis des Ningaloo Reef-Meerwassers ändern sich die maximalen Abweichungen auf 2.0 bzw. 3.3°C. Die mit den U/Ca-Extremwerten und NCEP-SST-Daten neu berechnete Geradengleichung einer von Min et al. (1995) bei Neukaledonien untersuchten Koralle (*Porites lobata*) nähert sich zwar unseren Geradengleichungen an, jedoch erhöhen sich die maximalen Abweichungen unter Einbeziehung dieser Geradengleichung bei 30 °C auf 4.6°C. Die Geradengleichung konnte jedoch nicht auf das U/Ca-Verhältnis des Ningaloo-Meerwassers normiert werden.

Mögliche Ursachen der stark variierenden U/Ca-SST-Beziehung, wie z.B. Konzentrationsunterschiede von gelöstem U im Meerwasser, Komplexbildung von U und unterschiedliche Wachstumsraten sind in Kap. 2 und 1.1 beschrieben.

Anhand der eigenen und der Ergebnisse aus der Literatur kann zunächst keine großräumige Anwendung eines U/Ca-Thermometers erfolgen. Inwieweit kleinräumige Unterschiede in der U/Ca-SST-Beziehung zwischen Korallen oder innerhalb einer Koralle bestehen, sollte Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.



**Abb. 18 (a)** Unkorrigierte U/Ca-SST-Geradengleichungen. **(b)** Die Regressionsgerade von Min et al. (1995) wurde mit den U/Ca- und NCEP-SST-Extremwerten neu berechnet. Die Verwendung der NCEP-SST's anstelle der Meßstationsdaten führt zu einer Annäherung gegenüber den anderen Regressionsgeraden. Die Geraden der in dieser Arbeit untersuchten Korallen wurden auf das U/Ca-Verhältnis des Ningaloo Reefs normiert.

**Tabelle 18** Geradengleichungen (U/Ca vs. SST) der Regressionsgeraden aus Abb. 18b.

$SST [^{\circ}C] = 62.07 - 31.575 \cdot U/Ca [\mu mol/mol]$	(Abrolhos Island)	(16)
$SST [^{\circ}C] = 73.94 - 39.794 \cdot U/Ca [\mu mol/mol]$	(Ningaloo Reef)	(17)
$SST [^{\circ}C] = 53.85 - 23.987 \cdot U/Ca [\mu mol/mol]$	(La Réunion, LR93)	(29)
$SST [^{\circ}C] = 73.15 - 39.290 \cdot U/Ca [\mu mol/mol]$	(New Caledonia, Min et al., 1995)	(30)

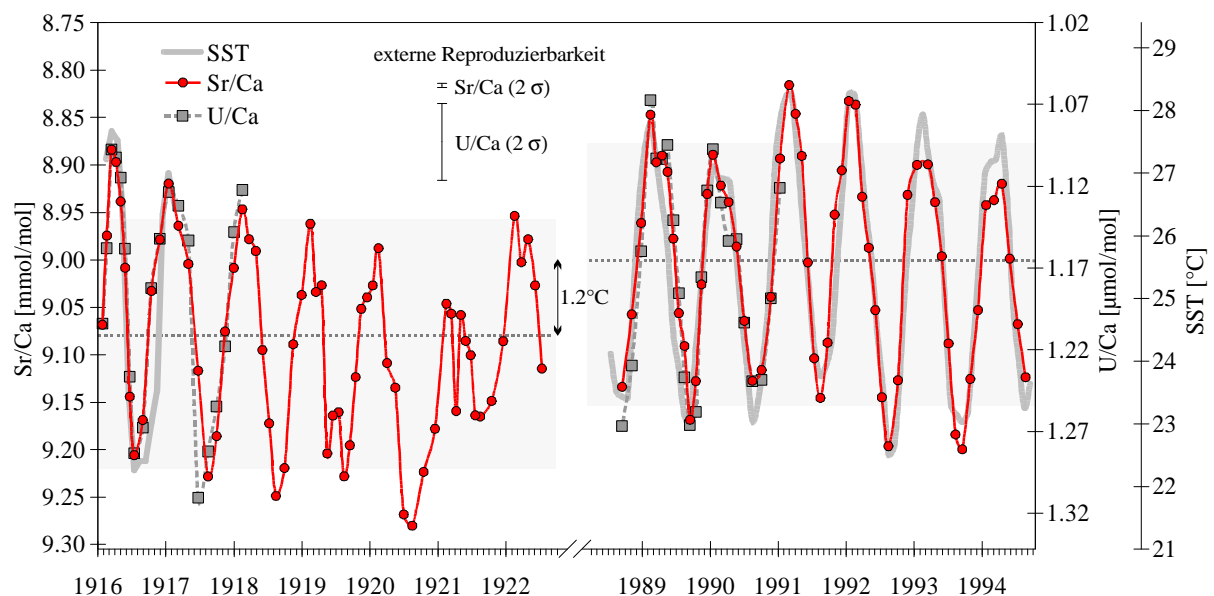
## 7 Anwendung der Sr/Ca- und U/Ca-Methode

### 7.1 Bestimmung von SST-Daten der jüngeren Vergangenheit

Ausreichend zuverlässige globale SST-Daten existieren lediglich für die letzten 20 bis 30 Jahre. So z.B. von Funk-Stationen, die ab 1958 jährliche Temperaturabschätzungen aus der Troposphäre aufzeichnen (Angell, 1988), oder von Satelliten, die ab 1979 monatliche Temperaturen messen (Spencer & Christy, 1990).

Zeitreihen von COADS-SST's gehen für einige Lokaltäten bis 1854 zurück, wobei jedoch zumeist größere Lücken in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts auftreten. In Gebieten zwischen den Wendekreisen des Äquators können aus Korallen gewonnene Sr/Ca-SST's diese Datenlücken schließen helfen und somit zur Messung lokaler oder auch Abschätzung globaler Erwärmung infolge des Treibhauseffektes beitragen.

An der Lokalität La Réunion wurde am Kern LR93 ein Zeitabschnitt von 7 Jahren zu Beginn dieses Jahrhunderts untersucht. Anhand der mittels Röntgenaufnahmen durchgeführten Sclerochronologie wurde der Abschnitt den Jahren 1914 bis 1920 zugeordnet (mdl. Mittlg. G. Heiss). Die zeitliche Zuordnung in Abb. 19 erfolgte jedoch mit Hilfe von drei Extremwerten eines kurzen COADS-SST Datensatzes aus den Jahren 1916/1917. Damit wurde der untersuchte Sr/Ca-Abschnitt den Jahren 1916 – 1922 zugeordnet. Der Unterschied in Bezug zur Sclerochronologie beträgt 2 Jahre.



**Abb. 19** Vergleich der Sr/Ca- und U/Ca-SST zwischen zwei Zeitabschnitten des Kerns LR93, Lokalität Cap La Houssaye, La Réunion. Die grau unterlegten Flächen markieren die jeweilige mittlere Saisonaltät, errechnet aus den Extremwerten der Sr/Ca-SST's. Die gepunkteten Geraden stellen die mittlere Sr/Ca-SST für beide Zeitabschnitte dar. Die etwa 1 Jahr lange SST-Meßreihe von 1916-1917 setzt sich aus COADS-Daten zusammen, von 1988-1994 wurden NCEP-SST's verwendet.

In den 7 Jahren von 1916-1922 beträgt die mittlere SST 24.4°C. Die mittlere Sr/Ca-SST der etwa 6 Jahre von 1989-1994 liegt ca. 1.2°C höher. Mit 4.1 bzw. 4.2°C ist die Saisonalität in beiden Zeitabschnitten etwa gleich stark (Tabelle 19). Die Amplituden der Sr/Ca-SST stimmen mit den Amplituden der U/Ca-SST innerhalb von 0.1% und die mittleren SST's beider Thermometer innerhalb 0.25°C überein. Die maximale Abweichung zwischen beiden Thermometern beträgt in einer von 43 Proben 2.0°C, ansonsten unter 1.0°C. Aufgrund der kurzen U/Ca-SST-Zeitreihen werden im folgenden lediglich die Daten der Sr/Ca-SST interpretiert.

Die von 1916-1922 rekonstruierten Sr/Ca-Temperaturen können als zuverlässig gelten, da hier vom selben Probenkern eine Sr/Ca-SST-Kalibration vorliegt. Ansonsten mögliche Fehlerquellen, wie z.B. auf einzelne Korallen-Individuen wirkende lokale Einflüsse, unterschiedliche Wachstumsachsen oder die Korrektur auf unterschiedliche Meerwasserkonzentrationen, können somit größtenteils vernachlässigt werden.

Der SST-Unterschied von 1.2°C erscheint in Hinblick auf die globale Erwärmung infolge des Treibhauseffektes, der damit häufig verbunden wird, zu hoch. Jedoch spiegelt diese SST-Differenz nicht die Änderung durch den Treibhauseffekt wider, sondern einen lokalen SST-Unterschied, der nicht global extrapoliert werden kann. So könnte z.B. ein zunehmender Wärmetransfer über den Indonesischen Durchfluß in den Indischen Ozean (Godfrey, 1996) zu einem überdurchschnittlichen Anstieg der SST im Indischen Ozean beitragen.

Der SST-Unterschied wird maßgeblich durch den Zeitraum mitbestimmt, über den gemittelt wird. Dieser ist mit je 6 und 7 Jahren zu kurz, um einen stetigen Erwärmungstrend von 1916-1994 zu quantifizieren. Jones (1994) zeigt, daß die Zeitspanne der untersuchten Temperaturabschnitte einen bedeutenden Einfluß auf die Berechnung globaler Temperaturtrends hat. In kurzen Zeitabschnitten wirkt sich der Einfluß von innerhalb darin auftretender ENSO-Ereignisse und Vulkanausbrüche stark aus. Nach Korrekturen der kurzzeitigen Einflüsse von ENSO-Ereignissen und Vulkanausbrüchen auf die globale Erwärmung berechnet Jones (1994) aus verschiedenen Temperaturdatensätzen einen stetigen Temperaturanstieg von 0.1°C pro Jahrzehnt seit 1958.

**Tabelle 19** Jeweils aus den Extremwerten berechnete maximale und minimale durchschnittliche Sr/Ca- und U/Ca-SST [°C] und die daraus ermittelte Saisonalität [°C] der zwei untersuchten Zeitabschnitte im Kern LR93. Die mittlere SST wurde aus allen Sr/Ca- bzw. U/Ca-SST's des jeweiligen Zeitabschnittes berechnet.

	Sr/Ca-SST 1914-1920	Sr/Ca-SST 1988-1994	Differenz	U/Ca-SST 1914-1915	U/Ca-SST 1988-1990	Differenz
Maxima	26.3	27.5	1.2	26.6	27.4	0.8
Minima	22.2	23.3	1.1	22.6	23.2	0.6
Saisonalität	4.1	4.2	0.1	4.0	4.2	0.2
mittlere SST	24.4	25.6	1.2	24.9	25.3	0.4

## 7.2 Bestimmung von Paläotemperaturen

Für höhere Breitengrade konnten bisher relativ sichere Paläotemperaturen aus Grönland- und Antarktis-Eiskernen mit Hilfe von  $\delta^{18}\text{O}$ -Messungen (Johnsen et al., 1992, Sowers & Bender, 1995, Hammer et al., 1994, Jouzel et al., 1987, Jouzel et al., 1995) oder  $\delta\text{D}$ -Messungen (Jouzel et al., 1993) rekonstruiert werden. Obwohl die genaue Beziehung zwischen atmosphärischer Temperatur und  $\delta^{18}\text{O}$  im Eis noch unsicher ist (Johnsen et al., 1995), besteht Übereinkunft, daß während des letzten glazialen Zyklusses in den Polarregionen Temperaturvariationen von 6 bis 10°C stattfanden.

Für die Ozeangebiete niedriger Breiten liegen hingegen widersprüchliche Ergebnisse vor. Mit  $\delta^{18}\text{O}$ -Messungen in Tiefseesedimenten (Shackleton, 1987, Broecker, 1986, Patrick & Thunell, 1997) werden SST-Abkühlungen von <3°C rekonstruiert. Für den Äquator des Indischen Ozeans bestimmen Bard et al. (1997) mit Hilfe von  $\text{U}^{k}_{37}$ -Verhältnissen (siehe Kap. 1) ca. 2°C kältere, bei 20° S um ca. 2.5°C kältere SST's im LGM gegenüber heute.

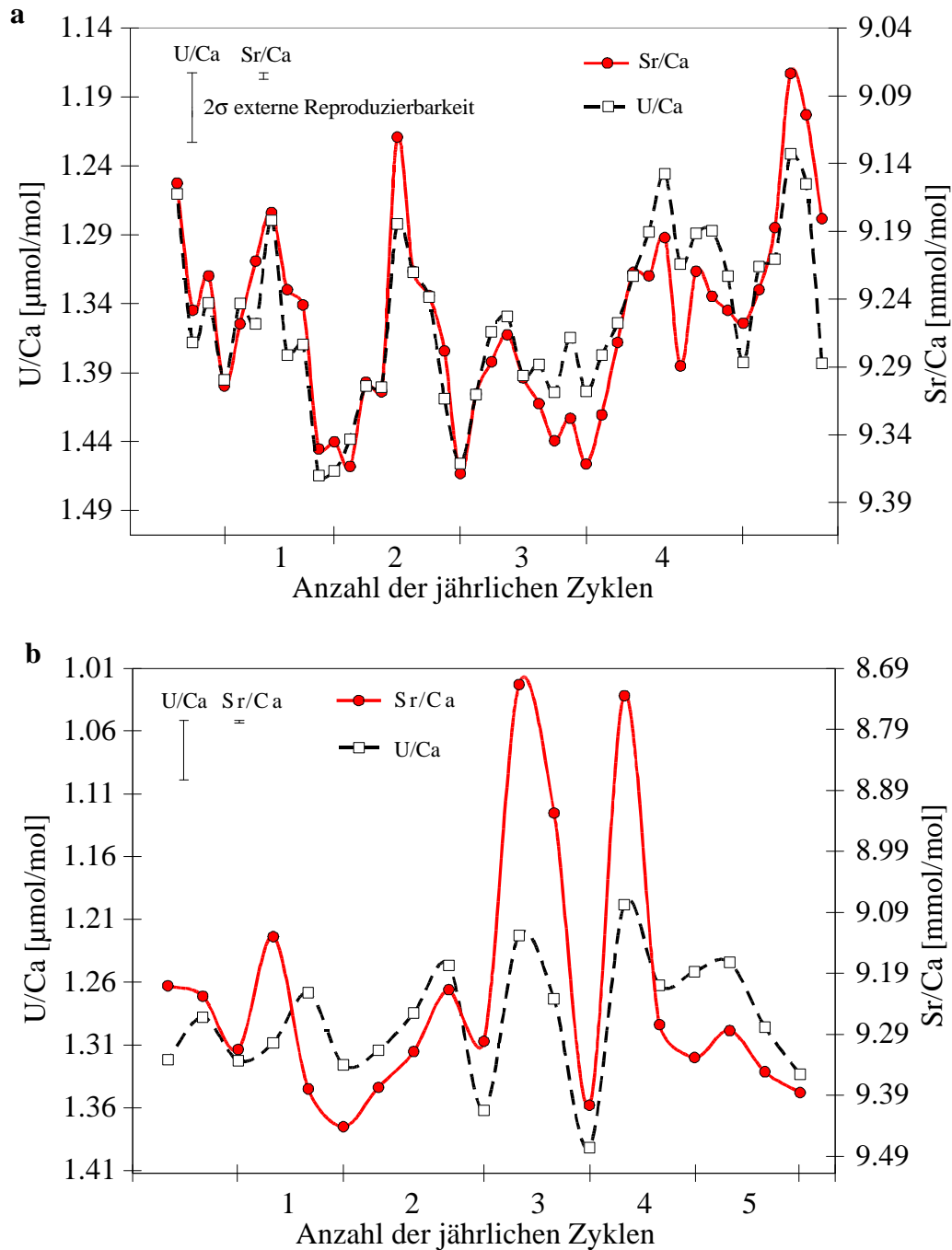
Kalte atmosphärische Temperaturen während des LGM's von 4 bis 8°C in den Tropen und Subtropen ergeben sich aus Schneegrenzen-Rekonstruktionen (Hope & Peterson, 1976, Broecker & Denton, 1989), und  $\delta^{18}\text{O}$ -Messungen in tropischem Gletschereis (Thompson et al., 1995). Terrestrische Pollenanalysen lassen auf 2-5°C kältere Temperaturen in den Tropen schließen (Rind & Peteet, 1985, Hope & Peterson, 1976). Stute et al. (1995) berechnen für tropische Regionen Südamerikas aus in eiszeitlichen Grundwässern gelösten Edelgasen um etwa 5°C niedrigere Temperaturen im LGM gegenüber heute. Anhand von Radiolarien-Vergesellschaftungen rekonstruierte SST's des östlichen äquatorialen Pazifik im LGM liegen ebenfalls 3-5°C unter den heutigen Werten (Pisias & Mix, 1997). Ergebnisse aus  $\delta^{18}\text{O}$ - und Sr/Ca-Messungen an Korallen von Barbados zeigen 6°C kältere SST's im LGM gegenüber rezenten SST's an (Guilderson et al., 1994). Auch Beck et al. (1997) rekonstruieren an einer ca. 10.4 ka alten Koralle aus dem SW-Pazifik (Vanuatu) 6.5°C kältere SST's in den Tropen. Sie zeigen damit, daß die während des LGM vorherrschenden kalten SST's in Teilen der Tropen noch relativ lange während der Entgletscherung anhielten, oder daß die Tropen längere kältere SST-Episoden während der Übergangsphase erfuhren. Jedoch stehen die von Beck et al. (1997) an dieser Lokation rekonstruierten SST im Widerspruch zu CLIMAP (Members, 1981, Members, 1994). CLIMAP kommt zu dem Ergebnis, daß die SST der Tropen in der Region von Vanuatu (SW-Pazifik) im LGM (ca. 18-20 ka vor heute) nur unwesentlich von der heutigen SST abweicht. Zu gleichen Ergebnissen für den tropischen pazifischen Ozean kommt das TEMPUS-Projekt, in dem globale Messungen an Alkenonen ausgewertet werden (Rosell-Melé, 1998).

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Rekonstruktion von Sr/Ca- und U/Ca-SST's des Früh-Holozäns und des letzten Interglazials dargestellt, um weitere Hinweise auf eine mögliche deutliche Abkühlung der SST der Tropen während dieser Perioden zu erhalten.

Um an fossilen Korallen Altersbestimmungen sowie SST-Rekonstruktionen durchführen zu können, muß diagenetisch unalterierter Aragonit vorliegen. Zur Prüfung dieser Voraussetzung können die in Kap. 1.1 aufgeführten Methoden angewendet werden. Ein weiterer Anhaltspunkt für diagenetisch unalterierten Aragonit ist das Vorhandensein der jährlichen Zyklizität der U/Ca-Verhältnisse (Min et al., 1995). In dieser Arbeit wurden die Sr/Ca- bzw. U/Ca-Verhältnisse zweier fossiler *Porites*-Korallen untersucht. Beide fossile Korallen entstammen einem Kern, der im Mai 1996 im Ningaloo Reef (siehe Kap. 1.1) von einem Schiff aus in einer Wassertiefe von 11 m erbohrt wurde (Kern-Lokation: 21°52.2'S, 113°57.8'E). Die hier beprobten Kernabschnitte stammen aus dem 2.2 m und 13.2 m Bereich des insgesamt 23 m langen Kernes. Die Korallen besitzen ein U/Th-Alter von ca.  $5.2 \pm 0.08$  ka und  $117 \pm 2$  ka. Mikroskopisch und röntgenographisch weist der 5 ka-Kern einen sehr guten Erhaltungszustand auf. Der 117 ka-Kern ist durch stark zementierte und mit Internsediment verfüllte Bereiche gekennzeichnet (mdl. Mitteilung H. Kuhnert, 1998), die zumindest das Sr/Ca-Verhältnis signifikant verändern. So sind drei Sr/Ca-Verhältnisse der 117 ka alten Koralle wesentlich niedriger, als durch den Vergleich mit den U/Ca-Verhältnissen erwartet (siehe Abb. 20b und Abb. 21). Wahrscheinlich ist dieser Abschnitt der Koralle von einem Sr-Verlust infolge der chemischen Alteration betroffen. Zyklische und vermutlich jährliche Sr/Ca- sowie U/Ca-Verhältnisse sind an beiden Kernen gut erkennbar. Im Vergleich mit den rezenten Korallen zeigen die Amplituden der fossilen Korallen jedoch ungleichmäßigere saisonale Schwankungen (Abb. 20). Die Sr/Ca- und U/Ca-Verhältnisse korrelieren in der Ningaloo- und Abrolhos-Koralle mit  $r = +0.85$  ( $n = 42$ ) und  $r = +0.64$  ( $n = 19$ ) signifikant ( $p < 0.05$ ).

Abb. 21 zeigt die Sr/Ca- und U/Ca-Verhältnisse beider Korallen mit den daraus berechneten SST als Funktion der jährlichen Zyklen. Die Paläo-SST-Bestimmungen basieren auf Gleichung 15 (Sr/Ca) und Gleichung 17 (U/Ca). Anhand des an der rezenten Ningaloo Reef-Koralle geeichten Sr/Ca- und U/Ca-Thermometers wird am 5 ka-Kern ein Versatz der U/Ca- gegenüber der Sr/Ca-SST sichtbar, welcher besonders deutlich bei den SST-Minima auftritt. Während die U/Ca-SST bei den Maxima um durchschnittlich 1.6°C unter der Sr/Ca-SST liegt, sind es bei den Minima 4.5°C. Mit dem U/Ca-Thermometer werden somit Minima-SST von bis zu ca. 15°C rekonstruiert, bei denen das Wachstum riffbildender Steinkorallen nicht möglich ist.

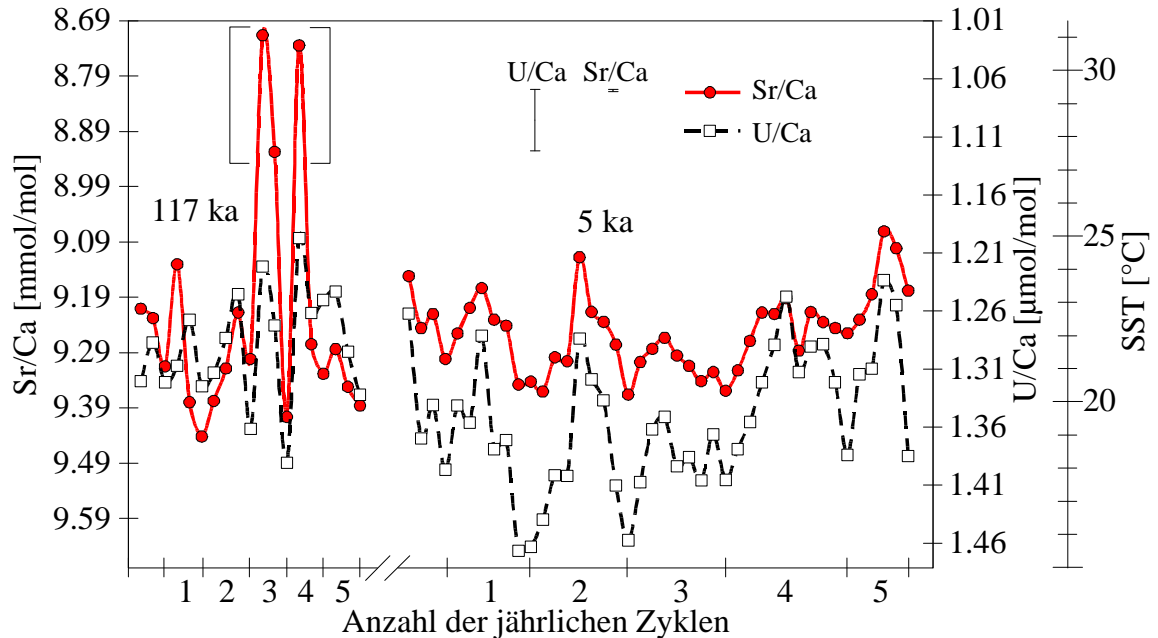
Eine Änderung der U/Ca-Meerwasserverhältnisse für die untersuchten Zeiträume ist aufgrund der Verweilzeiten für Ca und U im Meerwasser von 1.1 Millionen (Broecker & Peng, 1982) bzw. von 300 Tausend Jahren (Ku et al., 1977) nicht anzunehmen. Zumal zeigt die 117 ka-alte Koralle keinen U/Ca-Versatz gegenüber Sr/Ca an. Diagenetische Effekte sind nicht völlig auszuschließen, zumal die Elementverhältnisse nicht die für rezente Proben typischen gleichmäßigeren Amplituden zeigen. Diese Beobachtung läßt sich auch bei Beck et al. (1997) und McCulloch et al. (1996) machen.



**Abb. 20** Sr/Ca- und U/Ca-Verhältnisse fossiler *Porites lutea* Korallen. Zur Überprüfung der Saisonalität wurden die Sr/Ca- und U/Ca-Amplituden bestmöglichst angepaßt. Die mittlere Zuwachsrates der 5.2 ka alten Koralle (**a**) beträgt 6 mm/a, die der 117 ka alten Koralle 3.5 mm/a (**b**). An beiden Kernen ist die jährliche Saisonalität der Elementverhältnisse erkennbar. Mikroskopisch und röntgenographisch weist der 5 ka-Kern einen sehr guten Erhaltungszustand auf. Der 117 ka-Kern ist durch stark zementierte Bereiche gekennzeichnet (mdl. Mitteilung H. Kuhnert, 1998).

Die jährliche Saisonalität der Elementverhältnisse und der sehr gute Erhaltungszustand des 5 ka-Kerns sprechen zumindest für die sichere Bestimmung der mittleren SST. Bei stärkerer Alterierung des Aragonits wäre anzunehmen, daß die Saisonalität der Sr/Ca- und U/Ca-Verhältnisse verloren geht. Der hier beobachtete zeitliche Unterschied zwischen der U/Ca-SST-Beziehung steht in Einklang mit den bereits beobachteten räumlichen Unterschieden

entlang der Ostindik-Küste und La Réunion auf der Westindik-Seite. In den dort untersuchten rezenten Korallen treten signifikant unterschiedliche U/Ca-SST-Beziehungen auf (Abb. 14), die eine sichere großräumige Anwendung dieses Thermometers in Frage stellen.



**Abb. 21** Sr/Ca- und U/Ca-Verhältnisse beider fossiler Korallen in Bezug auf die aus Gleichung 15 und 17 berechneten SST's. Die drei in Klammern gefaßten Sr/Ca- und die dazugehörigen U/Ca-Verhältnisse wurden für die SST-Berechnungen in Tabelle 1 nicht verwendet, da sie aus zementierten Bereichen stammen.

Die gleichen, in den Kapiteln 2 und 1.1 diskutierten Ursachen kommen für den Versatz des U/Ca-Verhältnisses im fossilen 5.2 ka-Kern in Frage. So könnten z.B. Variationen des "upwelling"-Einflusses das beobachtete Phänomen verursachen. Shen & Dunbar (1995) berechnen auf der Basis eines Modells von Millero et al. (1993) bei einer relativ geringen  $\text{CO}_3^{2-}$ -Änderung von 6% eine mögliche Änderung des U/Ca-Verhältnisses der Koralle um 15%. Der in der 5.2 ka alten Koralle des Ningaloo Reefs auftretende U/Ca-Versatz beträgt hingegen nur etwa 5 bis 6%. Auf jeden Fall sollte dieser Aspekt bei Untersuchungen von Korallen an der Westaustralischen Küste aus dem LGM beachtet werden. McCorkle et al. (1993) finden anhand von Untersuchungen an Sedimentkernen deutlich stärkere "upwelling"-Einflüsse an der Westaustralischen Küste während des LGM gegenüber dem Holozän.

Ein systematischer Einfluß der Wachstumsrate auf das U/Ca-Verhältnis ist beim Vergleich der rezenten Koralle (12 mm/a) mit den fossilen Korallen (5.2 ka: 6 mm/a, 117 ka: 3 mm/a) des Ningaloo Reefs nicht zu erkennen.

Der 117 ka alte Kern mit einer Auflösung von jährlich 3 bis 4 Proben weist keinen Versatz zwischen Sr/Ca- und U/Ca-SST auf. Trotzdem liegt die Sr/Ca-SST der Maxima ca.  $2.7^\circ\text{C}$  über der U/Ca-SST. Grund hierfür sind 3 extrem hohe Sr/Ca-SST-Maxima, die aus diagenetisch veränderten Bereichen der Koralle stammen. Bei Weglassen dieser 3 Proben reduziert

sich die Differenz zwischen Sr/Ca- und U/Ca-SST-Maxima auf  $-0.2^{\circ}\text{C}$ . Die Sr/Ca-SST der Minima liegt im Mittel nur  $0.1^{\circ}\text{C}$  über der U/Ca-SST. In Tabelle 20 sind die SST's für beide fossilen Kerne zusammengefaßt.

**Tabelle 20** Sr/Ca- und U/Ca-SST-Werte. Für die Berechnung wurden die jeweiligen Extremwerte gemittelt. Für die mittlere SST wurden jeweils alle Daten gemittelt. Beim 117 ka alten Kern wurden 3 in Abb. 6 gekennzeichnete Sr/Ca- und die dazugehörigen U/Ca-Werte nicht verwendet.

Alter	Max SST [ $^{\circ}\text{C}$ ]		Min SST [ $^{\circ}\text{C}$ ]		Saisonalität [ $^{\circ}\text{C}$ ]		Mittlere SST [ $^{\circ}\text{C}$ ]		Wachstum [mm/a]
	Sr/Ca	U/Ca	Sr/Ca	U/Ca	Sr/Ca	U/Ca	Sr/Ca	U/Ca	
rezent	27.5	27.4	23.4	23.2	4.1	4.2	25.5	25.4	12
5.2 ka	24.7	23.0	22.1	17.6	2.6	5.5	23.0	20.0	6
117 ka	23.8	24.0	20.9	20.8	2.9	3.1	21.9	22.1	3.5

Aufgrund der offensichtlich größeren Unsicherheiten der U/Ca-SST-Rekonstruktion wird das Sr/Ca-Thermometer als zuverlässiger betrachtet. Für einen Abschnitt von ca. 5 Jahren beträgt die mittlere Sr/Ca-Temperatur des 5.2 ka-Kerns  $23.0^{\circ}\text{C}$  mit einer Schwankungsbreite der Extrema um  $+1.7$  und  $-0.9^{\circ}\text{C}$ . Der 117 ka-Kern zeigt für den gleichen Zeitabschnitt eine mittlere SST von  $21.9^{\circ}\text{C}$ , die Extremwerte schwanken um  $+1.9$  und  $-1.0^{\circ}\text{C}$ . Bei einer aus der untersuchten rezenten Koralle errechneten mittleren SST von  $25.5^{\circ}\text{C}$  mit Schwankungen der Extrema von  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  zeigt der 5.2 ka-Kern eine gegenüber heute  $2.5^{\circ}\text{C}$  kältere mittlere SST an. Für den 117 ka-Kern errechnen sich um  $3.6^{\circ}\text{C}$  kältere Temperaturen. Ähnliche Beobachtungen lassen sich bei den Wachstumsraten und der Saisonalität machen, welche in den fossilen Korallen ebenfalls niedriger sind (Tabelle 20).

In Bezug auf die im Zusammenhang mit dem Versatz des U/Ca-Verhältnisse in der 5.2 ka-Koralle diskutierte Möglichkeit von "upwelling" könnte argumentiert werden, daß die am Ningaloo Reef aufgezeichnete niedrige Früh-Holozäne SST ein regionales Phänomen ist. Die von der Koralle aufgezeichneten Sr/Ca-SST's wären dann das Ergebnis der Durchmischung von warmen Oberflächenwasser mit kälterem Tiefenwasser. Die Untersuchungsergebnisse von McCorkle et al. (1993) lassen für den Zeitraum vor ca. 5 ka jedoch keine Anzeichen für verstärktes "upwelling" erkennen. Somit kann angenommen werden, daß entlang der Küstenlinie Westaustraliens, ähnlich den heutigen Verhältnissen, der Leeuwin Strom die Wassertemperatur beeinflusst und "upwelling" unterdrückt hat. Dieser wird besonders im Norden über den Nordwestschelf mit Wassermassen aus dem WPWP gespeist (Pattiaratchi & Buchan, 1991). Aufgrund dieser Verbindung werden heute SST-Variationen des WPWP mit einer Verzögerung von ca. 2 Jahren auf das Ningaloo Reef übertragen (siehe Kap. 7.3). Folglich stellt die am Ningaloo Reef rekonstruierte Früh-Holozäne SST kein durch "upwelling"-Prozesse verursachtes Phänomen dar, sondern reflektiert die SST des Leeuwin Stromes, die

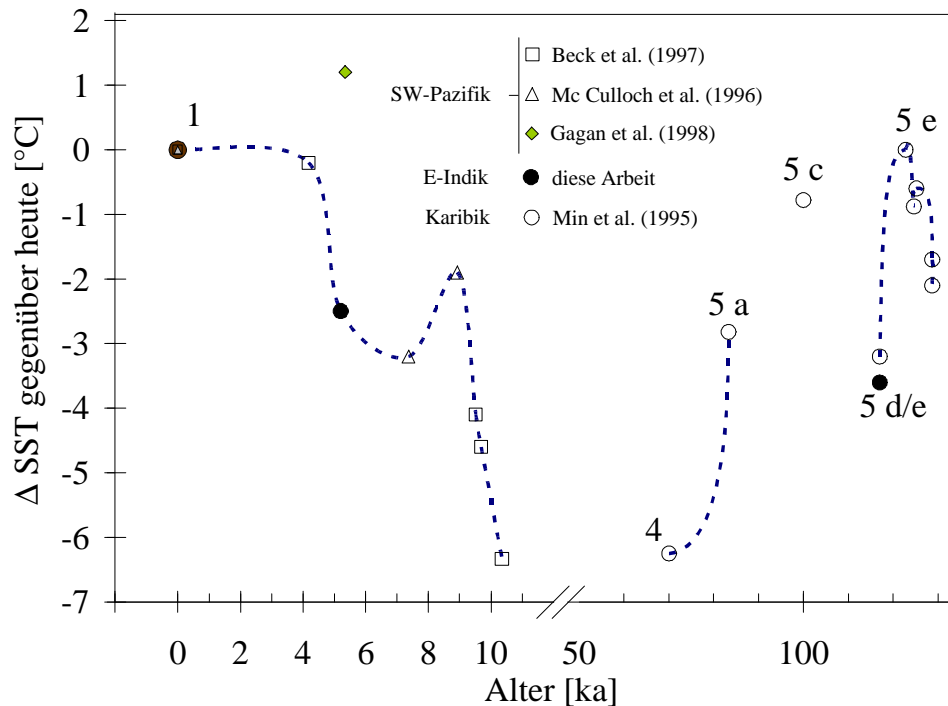


neben den regionalen Einflüssen auch von SST-Variationen aus dem Pazifik bestimmt werden. Ein Anhaltspunkt für den auch vor 5.2 ka bestehenden Wärmeaustausch zwischen WPWP und Indischen Ozean über den Leeuwin-Strom ergibt sich aus dem Vergleich der Sr/Ca-SST-Werte der 5.2 ka-Koralle mit anderen publizierten fossilen *Porites*-Sr/Ca-SST's aus dem SW-Pazifik (Abb. 22) (Beck et al., 1997, McCulloch et al., 1996, Gagan et al., 1998). Um definitive Aussagen über das Klima während der für die Korallen datierten Zeit zu machen, sind die hier untersuchten wie auch die publizierten Zeitreihen zu kurz. Trotzdem ergibt die Darstellung der aus unterschiedlichen Laboren stammenden Ergebnisse ein homogenes Bild. Der SST-Wert vom Ningaloo Reef fügt sich sehr gut in die von Beck et al. (1997) zwischen 4 und 7 ka interpolierte SST-Kurve ein. Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang auch der Vergleich zwischen den Ergebnissen von CLIMAP hinsichtlich der in Beck et al. (1997) und in dieser Arbeit untersuchten Lokalitäten. Während von CLIMAP an der von Beck et al. (1997) untersuchten Lokation Vanuatu im SW-Pazifik nur unwesentlich veränderte SST während des LGM gegenüber heute rekonstruiert werden und damit ein Widerspruch zwischen Sr/Ca-SST und der CLIMAP-SST für diese Region besteht, herrschten laut CLIMAP an der in dieser Arbeit beprobten Lokation Ningaloo Reef für das LGM 3 bis 6°C kältere SST. Leider liegen noch keine Sr/Ca-SST's für das Ningaloo Reef während des LGM vor, um die Übereinstimmung zwischen diesen beiden und weiteren unabhängigen Klimaproxys an dieser Lokation zu prüfen.

Klima-Aufzeichnungen aus tropischen Eiskernen der nördlichen zentralen Anden (10°S) (Thompson et al., 1995) und von Südgeorgien (54°S) (Clapperton et al., 1989) oder der Wostok-Eiskern (80°S) (Jouzel et al., 1993) zeigen für die Zeit vor 5 ka eine leichte atmosphärische Erwärmung (<1°C) der Südhalbkugel an.

Weitere Klimarekonstruktionen auf der Südhalbkugel deuten ebenfalls auf leicht wärmere SST's für die Zeit vor ca. 5.2 ka hin. SST-Aufzeichnungen aus Alkenonen in Sedimentkernen des Indischen Ozeans (Bard et al., 1997), deren Probenlokation ähnlich dem Ningaloo Reef bei ca. 20° südlicher Breite liegt, lassen bei 5.2 ka eine leichte Erwärmung von ca. 0.3°C erkennen. Ein von Gagan et al. (1998) veröffentlichter Sr/Ca-SST-Wert einer ca. 5.4 ka alten Koralle aus dem SW-Pazifik vor der ostaustralischen Küste zeigt eine gegenüber heute 1.2° C wärmere SST auf. Dieser Wert steht auch im Einklang mit terrestrischen Pollen- und Baumgrenzen-Aufzeichnungen im tropischen SW-Pazifik-Raum, die in der Zeit von 7 bis 4 ka ein generell wärmeres Klima auf dem Festland vermuten lassen (Anderson et al., 1988, McGlone et al., 1994). In diesen Zeitraum fallen jedoch auch 3 von verschiedenen Laboren und Probenlokalitäten bestimmte Sr/Ca-SST-Werte südlich des Äquators, die gegenüber heute niedrigere mittlere Meerwassertemperaturen belegen (Abb. 22). Möglich wäre, daß die SST's des Ningaloo Reefs im Indischen Ozean und bei Vanuatu und Neuguinea im SW-Pazifik zu dieser Zeit noch nicht den globalen atmosphärischen Erwärmungstrend widerspiegeln.

Die im 117 ka-Kern gemessene, gegenüber heute um 3.6°C bzw. 3.3°C kältere mittlere Sr/Ca- und U/Ca-SST stimmt sehr gut mit der von Min et al. (1995) anhand einer Koralle (*Acropora palmata*) von Barbados für diese Zeit rekonstruierte U/Ca-SST von ca 3.2°C überein (Abb. 22). Dieses Ergebnis unterstützt ebenfalls die Vermutung, daß die SST-Variationen der Tropen zumeist größer sind, als von CLIMAP angenommen wird. Die sichere Beantwortung der Frage, ob die Tropen im Früh-Holozän bzw. LGM stärkere SST-Abkühlungen erfuhren, ist aufgrund der bisherigen Studien und der geringen Datendichte noch nicht möglich.



**Abb. 22** (nach Beck et al., 1997; Min et al., 1995) Mittlere Paläo-Sr/Ca-SST's von *Porites*-Korallen. Die Sr/Ca-SST's sind als Abweichung von der heutigen mittleren SST dargestellt. Die Datenpunkte der fossilen Proben stellen Mittelwerte aus 4-6 Jahresabschnitten dar. Die offenen Kreise sind U/Ca-SST's von *Acropora palmata* von Barbados (aus Min et al., 1995). Die gefüllten Kreise stellen die mittleren Sr/Ca-SST's aus ca. 5 Jahrgängen unserer 5.2 und 117 ka alten *Porites lutea*-Koralle dar. Als Datenbeschriftung sind die Sauerstoff-Isotopen-Stadien angegeben.

### 7.3 Proxies für vulkaninduzierte Signale und klimatische Ereignisse

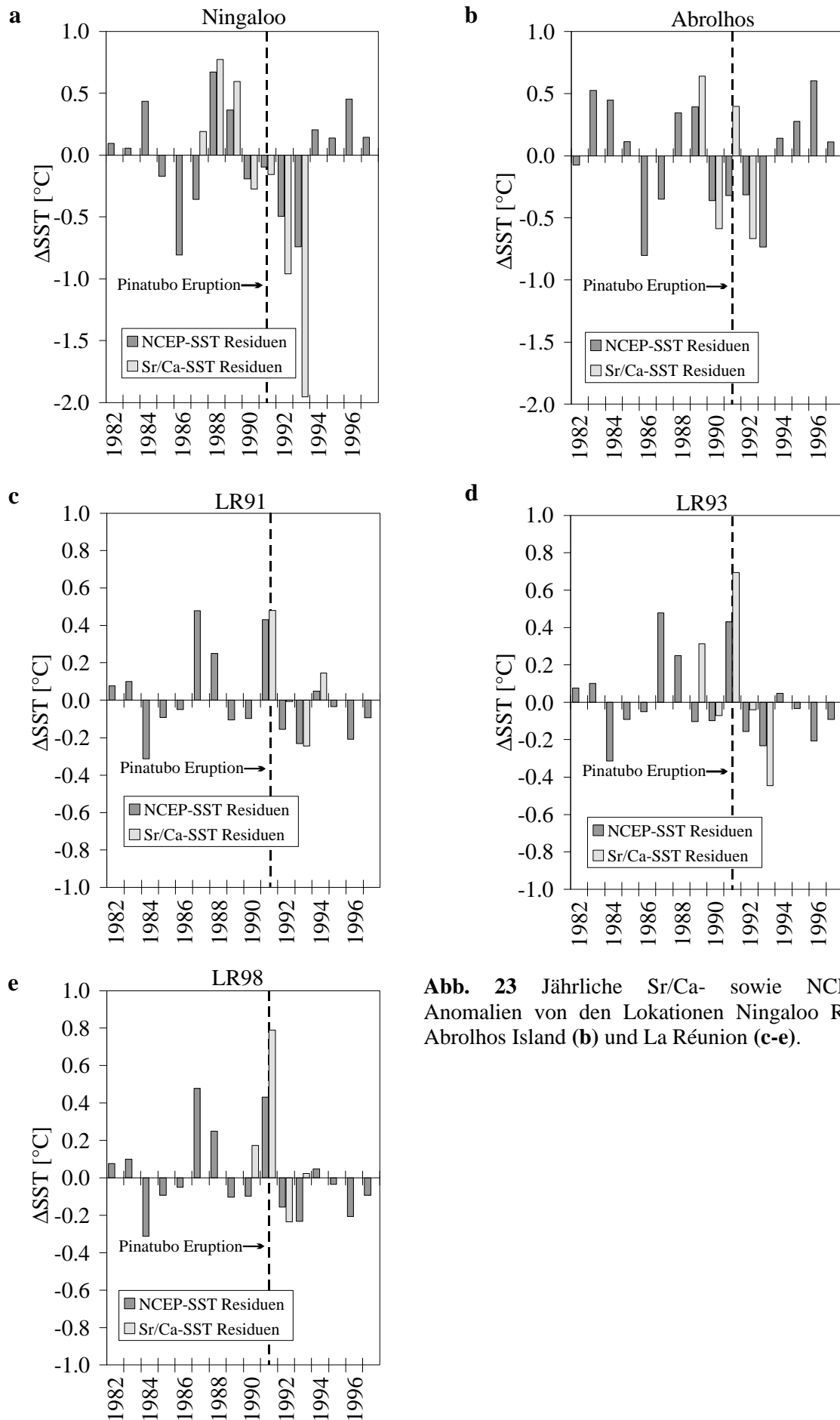
Neben der Rekonstruktion von SST-Langzeittrends und Paläotemperaturen wird in jüngerer Zeit versucht, durch Vulkanausbrüche induzierte Abkühlungen der SST anhand von Korallenkernen nachzuweisen. Gagan & Chivas (1995) berechnen anhand von  $\delta^{18}\text{O}$ -Daten einer Koralle vom Ningaloo Reef eine durch den Vulkanausbruch des Mount Pinatubo im Juni 1991 erfolgte Abkühlung der SST des Leeuwin Stromes um 0.6°C im Jahr 1992 und 0.9°C im Jahr 1993. Dazu eliminieren sie den Einfluß des WPWP auf das Korallen-SST-Signal. Crowley et al. (1997) können bei der Auswertung ihrer 335 Jahre zurückreichenden  $\delta^{18}\text{O}$ -Chronologie einer *Porites*-Koralle vulkaninduzierte Abkühlungen nachweisen. Von 20 Vulkaneruptionen werden 16 durch einen gleichzeitigen oder innerhalb des darauffolgenden

Jahres erfolgenden sprunghaften Anstieg der  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte begleitet. 12 der 16 vermutlich vulkaninduzierten  $\delta^{18}\text{O}$ -Änderungen gehen jedoch auch mit durch ENSO hervorgerufenen Abkühlungsereignissen einher.

Die von Gagan & Chivas (1995) vorgestellte Berechnung der vulkaninduzierten SST-Abkühlung wird hier trotz der etwa 10-fach höheren externen Reproduzierbarkeit von Sr/Ca- gegenüber  $\delta^{18}\text{O}$ -Messungen nicht angewendet. Mögliche Fehlerquellen, wie z.B. jährliche SST-Anomalien des WPWP, die je nach Berechnungsgrundlage Abweichungen von bis zu  $0.5^\circ\text{C}$  aufweisen (Yan et al., 1992), sowie die hohe räumliche und zeitliche Variabilität des Leeuwin-Stromes (Pattiaratchi & Buchan, 1991) verursachen bei einer quantitativen Berechnung vulkaninduzierter SST-Abkühlung im Bereich von ca.  $1^\circ\text{C}$  zu hohe Unsicherheiten.

Zur Berechnung der Sr/Ca-SST-Anomalien wurden monatliche Sr/Ca-SST-Werte durch lineare Interpolation ermittelt. Um die gewöhnlichen jährlichen saisonalen SST-Schwankungen zu entfernen, wurde von den monatlichen Sr/Ca- und NCEP-SST's der jeweilige monatliche NCEP-Mittelwert von 1982-97 subtrahiert. Die mittleren SST-Anomalien berechnen sich wie bei Gagan et al. (1995) aus den Monaten Januar bis April und Juli bis Oktober.

Zunächst sollen die SST-Residuen an der Lokation Ningaloo Reef betrachtet werden, da diese dem Pinatubo am nächsten liegt. Die in Abb. 23a dargestellten jährlichen Anomalien der Sr/Ca-SST am Ningaloo Reef zeigen den gleichen Trend wie die NCEP-SST. Im Jahr 1992 liegt die Sr/Ca-SST  $1^\circ\text{C}$ , die NCEP-SST  $0.6^\circ\text{C}$  unter der durchschnittlichen jährlichen SST, im Jahr 1993  $1.9^\circ\text{C}$  bzw.  $0.8^\circ\text{C}$ . In beiden Fällen ist eine ca. 2-jährige Abkühlung der SST zu erkennen, die ihren Höhepunkt im zweiten Jahr hat. Die maximale globale Abkühlung an der Erdoberfläche nach dem Pinatubo-Ausbruch trat Anfang bis Mitte 1992 auf, sie betrug etwa  $0.3$  bis  $0.7^\circ\text{C}$  (Jones, 1994, Dutton & Christy, 1992). Am Ningaloo Reef tritt die maximale Abkühlung der SST erst 1993 auf. Die Verzögerung entsteht durch Wasser aus dem WPWP, das über den Indonesischen Durchfluß in den Leeuwin-Strom gelangt und somit eine Verlängerung des Aerosol-induzierten Abkühlungssignals am Ningaloo Reef erzeugt (Gagan & Chivas, 1995). Nach 1994 lagen die jährlichen SST-Anomalien wieder leicht über dem Durchschnittswert. Die dem Pinatubo-Ausbruch folgenden Jahre 1992/93 weisen auffallend hohe Unterschiede zwischen Sr/Ca- und NCEP-SST auf (Abb. 23a). Die Sr/Ca-SST ist 1992 zweifach und 1993 ca. 2.5 mal kühler gegenüber der NCEP-SST. Eine Erklärung hierfür könnte die unterschiedliche räumliche Ausdehnung der SST-Aufzeichnungen geben. Die Sr/Ca-SST zeichnet die SST unmittelbar an der Probenlokation auf, die unmittelbar vom Leeuwin Strom beeinflusst wird. Die NCEP-SST interpoliert über ein Gradnetz von  $1^\circ \times 1^\circ$ , also ca.  $10\,000\text{ km}^2$ , in dem auch Gebiete außerhalb vom Leeuwin Strom erfaßt werden.



**Abb. 23** Jährliche Sr/Ca- sowie NCEP-SST-Anomalien von den Lokationen Ningaloo Reef (a), Abrolhos Island (b) und La Réunion (c-e).

So könnten zum Zeitpunkt der verstärkten vulkaninduzierten Abkühlung des Leeuwin Stromes angrenzende Gebiete wärmere SST's aufweisen.

Das Abkühlungssignal läßt sich auch 800 km südlich, bei den Abrolhos Islands, mit ähnlichen Werten feststellen, wobei hier die Sr/Ca-SST von 1993 fehlt (Abb. 23b).

Eine vergleichbar starke SST-Abkühlung ( $0.7^{\circ}\text{C}$ ) wie in den Jahren 1992/93 tritt 1986 am Ningaloo Reef und an Abrolhos Island auf (nur noch NCEP-SST-Aufzeichnungen). An einem *Porites*-Kern aus dem äquatorialen West-Indik (Seychellen) gewonnene  $\delta^{18}\text{O}$ -Aufzeichnungen zeigen einen starken Zusammenhang mit dem "Asian monsoon index" (Charles et al., 1997). Ein besonders starker Monsun trat 1985 auf, der eine SST-Abkühlung in der Größenordnung von ca.  $1^{\circ}\text{C}$  verursachte. Diese Abkühlung wurde ebenfalls in der von Charles et al. (1997) untersuchten Koralle aufgezeichnet. Die 1986 am Ningaloo Reef und bei Abrolhos Island auftretende SST-Anomalie (Abb. 23a/b) spiegelt wahrscheinlich ebenfalls dieses Ereignis wider. Mittels des Äquatorialen Gegenstromes und des schwachen geostrophischen Flusses subtropischen Wassers aus dem zentralen Indischen Ozean (Pattiaratchi & Buchan, 1991), tritt das SST-Signal an den Probenlokationen mit ca. 1 Jahr Verzögerung auf. Dies würde bedeuten, daß Korallen an der westaustralischen Küste neben SST-Variationen des WPWP auch durch den asiatischen Monsun hervorgerufene SST-Variationen im äquatorialen Indik widerspiegeln. An der Probenlokation La Réunion sind erwartungsgemäß keine deutlichen Anzeichen für die Vulkan- oder Monsun-induzierte Abkühlung zu erkennen. Jedoch zeigen die NCEP- wie auch die Sr/Ca-SST's den gleichen zweijährigen Abkühlungstrend, der am Ningaloo Reef deutlich ausgeprägt ist (Abb. 23c/d). Am Kern LR 98 trifft dies, bis auf die nicht vorhandene Sr/Ca-SST von 1993 ebenfalls zu (Abb. 23e).

## 8 Zusammenfassung

An rezenten Korallen (*Porites lutea*) vor der westaustralischen Küste im Ostindik (Ningaloo Reef und Abrolhos Islands, 21°54.3'S, 113°57.9'E / 28°27.7'S, 113°46.1'E) sowie einer Lokation im Westindik (La Réunion, 55°15' E, 21°00' S) wurden Sr/Ca- und U/Ca-Profile bestimmt. Alle Lokationen sind von "upwelling" unbeeinflusst und stehen in Verbindung mit dem offenen Ozean. Ziel dieser Messungen ist, die Sr/Ca- und U/Ca-Verhältnisse als "Proxies" für die Meerwasseroberflächentemperaturen (SST: sea surface temperature) zu testen. Desweiteren wurden zwei fossile Korallen vom Ningaloo Reef (Kern-Lokation: 21°52.2'S, 113°57.8'E) mit einem U/Th-Alter von ca.  $5.2 \pm 0.08$  ka und  $117 \pm 2$  ka zur Rekonstruktion von Paläo-SST's untersucht, um weitere Hinweise auf eine mögliche deutliche Abkühlung der SST der Tropen während dieser Perioden zu erhalten.

Die Untersuchungen an den rezenten Korallen zeigen, daß die Sr/Ca-Verhältnisse im Aragonit mit den empirisch gemessenen SST's (NCEP- und COADS-Daten) übereinstimmen, so daß im Bereich zwischen 20 und 30°C eine eindeutige linear inverse Beziehung zwischen SST und Sr/Ca erstellt werden kann. Unterschiede, die sich durch die Verwendung der monatlichen COADS- und NCEP-SST-Datensätze an den drei untersuchten Probenlokalationen ergeben, betragen im Mittel unter 0.5°C, maximal 1.5°C. Aufgrund von Ausreißertests und der besseren Übereinstimmung der Geraden wird die NCEP-SST bevorzugt.

Die Sr/Ca-Verhältnisse im Meerwasser der drei Lokalitäten variieren um nur 0.1%. Bei der Bestimmung von Sr/Ca-SST's in Korallen entspricht dies einer Unsicherheit von ca. 0.2°C. Die Sr/Ca-SST-Beziehung scheint nach den hier gefundenen Ergebnissen weitgehend unabhängig von der Lokation im Indischen Ozean zu sein. Jedoch zeigen drei bei La Réunion untersuchte Korallen eine positive Abhängigkeit der Sr/Ca-Verhältnisse von der Wachstumsrate. Bei Wachstumsunterschieden zwischen 9 und 13 mm/a betragen die daraus resultierenden Unsicherheiten auf die SST bezogen ca. 1.4°C. Da diese Wachstumsunterschiede im Sommerhalbjahr auftreten, resultieren daraus größere Unterschiede bei den SST-Maxima. Unter Einbeziehung aller 5 untersuchten Korallen kann eine Rekonstruktion mittlerer SST's des Indischen Ozeans im Bereich von 20°C bis 30°C mit einer statistischen Genauigkeit von ca.  $\pm 0.8^\circ\text{C}$  angegeben werden. An den SST-Maxima beträgt die statistische Genauigkeit ca.  $\pm 1.2^\circ\text{C}$ , an den Minima  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ .

Unter Einbeziehung der bisherigen veröffentlichten Sr/Ca-Regressionsgeraden von *Porites*-Korallen verschlechtert sich die Genauigkeit des Sr/Ca-Thermometers. Ein Grund hierfür ist die größere Variabilität der globalen Sr/Ca-Meerwasserverhältnisse. Die Variation der veröffentlichten und in dieser Arbeit gemessenen Sr/Ca-Verhältnisse in Korallenriff-Meerwässern beträgt maximal 1.4%, was einer Unsicherheit in der Sr/Ca-SST-Bestimmung von 2.3°C entspricht. Ein weiterer Grund für die höheren Ungenauigkeiten ist die

Verwendung unterschiedlicher SST-Datensätze. Nach der Korrektur der meisten Geraden auf das Sr/Ca-Meerwasserverhältnis des Ningaloo Reefs und der Verwendung des NCEP-Datensatzes für die jeweiligen Lokationen verbessert sich zwar die Übereinstimmung der Geraden, die verbleibende statistische Unsicherheit beträgt jedoch ca.  $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ . Eine Verbesserung der Genauigkeit scheint auch durch geeignete Standardisierungsverfahren zwischen den Laboren möglich. Bis dahin sollte das Sr/Ca-Thermometer an der Probenlokation kalibriert werden, um lokale Einflußgrößen auf das Sr/Ca-Verhältnis der Koralle sowie laborspezifische Gegebenheiten in die Geradengleichung mit einzubeziehen. Weitere Untersuchungen, mit dem Ziel den positiven Wachstumseinfluß auf das Sr/Ca-Verhältnis der Koralle zu verifizieren und eventuell zu korrigieren, sind nötig.

Die U/Ca-Verhältnisse zeigen ebenfalls einen eindeutigen inversen Zusammenhang zur empirisch gemessenen Temperatur, jedoch sind die Korrelationsgeraden für die drei untersuchten Lokationen signifikant unterschiedlich, so daß Zweifel an der Anwendbarkeit dieses Elementverhältnisses zur Rekonstruktion von Paläo-SST's angebracht sind. Bezogen auf unsere 3 Lokalitäten im Indischen Ozean variiert das U/Ca-Verhältnis des gefilterten Meerwassers um 1.5%, entsprechend einem SST-Unterschied von  $0.8^{\circ}\text{C}$ . Unter Einbeziehung der auf das Meerwasser-U/Ca-Verhältnis des Ningaloo Reefs normierten Geradengleichungen beträgt die statistische Genauigkeit bei der Rekonstruktion mittlerer SST's des Indischen Ozeans im Bereich von  $20^{\circ}\text{C}$  bis  $30^{\circ}\text{C}$  ca.  $\pm 1.3^{\circ}\text{C}$ . An den SST-Maxima beträgt die statistische Genauigkeit ca.  $\pm 1.6^{\circ}\text{C}$ , an den Minima  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ .

Der Ausbruch des Pinatubo 1991 ist in der Koralle des Ningaloo Reefs durch einen SST-Abfall gegenüber dem Langzeitmittelwert um ca.  $1^{\circ}\text{C}$  im Jahr 1992 und  $1.9^{\circ}\text{C}$  im Jahr 1993 aufgezeichnet. Durch den asiatischen Monsun verursachte SST-Anomalien scheinen sich ebenfalls an der westaustralischen Küste auszuwirken.

Die Sr/Ca-Verhältnisse der fossilen Korallen konnten zur Rekonstruktion der SST vor 5.2 ka und vor 117 ka verwendet werden. Es zeigt sich, daß die mittleren Temperaturen vor 5.2 ka ca.  $2.5^{\circ}\text{C}$  und vor 117 ka ca.  $3.6^{\circ}\text{C}$  kühler waren als dies heute der Fall ist. Ein Anhaltspunkt für den auch vor 5.2 ka bestehenden Wärmeaustausch zwischen WPWP und Indischen Ozean über den Leeuwin-Strom ergibt sich aus dem Vergleich der Sr/Ca-SST-Werte der 5.2 ka-Koralle mit anderen publizierten fossilen *Porites*-Sr/Ca-SST's aus dem SW-Pazifik. Die rekonstruierten SST's geben weiteren Anlaß zu der Vermutung, daß die SST der Tropen während des Früh-Holozäns und des Pleistozäns stärkeren Klimaschwankungen ausgesetzt waren, als zumeist von CLIMAP und anderen unabhängigen SST-Proxys angenommen wird.

## 9 Literaturverzeichnis

- Alibert C. & McCulloch M. T. (1997) Strontium / calcium ratios in modern Porites corals from the Great Barrier Reef as a proxy for sea surface temperature; calibration of the thermometer and monitoring of ENSO. *Paleoceanography* **12**, 345-363.
- Anderson P. M., Barnosky C. W., Bartlein P. J., Behling P. J., Brubaker L., Cushing E. J., Dodson J., Dvornetsky B., Guetter P. J., Harrison S. P., Huntley B., Kutzbach J. E., Markgraf V., Marvel R., McGlone M. S., Mix A., Moar N. T., Morley J., Perrott R. A., Peterson G. M., Prell W. L., Prentice I. C., Ritchie J. C., Roberts N., Ruddiman W. F., Salinger M. J., Spaulding W. G., Street P. F. A., Thompson R. S., Wang P. K., Webb T., III, Winkler M. G., & Wright H. E., Jr. (1988) Climatic changes of the last 18,000 years; observations and model simulations. *Science* **241**, 1043-1052.
- Angell J. K. (1988) Variations and trends in tropospheric and stratospheric global temperatures, 1958-87. *J. Climate* **1**, 1296-1313.
- Bard E., Rostek F., & Sonzogni C. (1997) Interhemispheric synchrony of the last deglaciation inferred from alkenone paleothermometry. *Nature* **385**, 707-710.
- Batteen M. L. & Rutherford M. J. (1990) Modeling studies of eddies in the Leeuwin Current: The role of thermal forcing. *J. Phys. Oceanogr.* **20**, 1484-1520.
- Beck J. W., Edwards R. L., Ito E., Taylor F. W., Recy J., Rougerie F., Joannot P., & Henin C. (1992) Sea-surface temperature from coral skeletal strontium / calcium ratios. *Science* **257**, 644-647.
- Beck J. W., Recy J., Taylor F., Edwards R. L., & Cabioch G. (1997) Abrupt changes in early Holocene tropical sea surface temperature derived from coral records. *Nature* **385**, 705-707.
- Beers J. R. & Stewart G. L. (1970) The preservation of acantharians in fixed plankton samples. *Limnol. Oceanogr.* **15**, 825-827.
- Bernstein R. E., Betzer P. R., Feely R. A., Byrne R. H., Lamb M. F., & Michaels A. F. (1987) Acantharian fluxes and strontium to chlorinity ratios in the North Pacific Ocean. *Science* **237**, 1490-1494.
- Brassell S. C., Eglinton G., Marlowe I. T., Pflaumann U., & Sarnthein M. (1986) Molecular stratigraphy; a new tool for climatic assessment. *Nature* **320**, 129-133.
- Broecker W. S. (1986) Oxygen isotope constraints on surface ocean temperatures. *Quaternary Research* **26**, 121-134.
- Broecker W. S. & Denton G. H. (1989) The role of ocean-atmosphere reorganizations in glacial cycles. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **53**, 2465-2501.



- Broecker W. S. & Peng T.-H. (1982) *Tracers in the sea. Lamont-Doherty Geological Observatory, Columbia University, New York.*
- Buddemeier R. W., Maragos J. E., & Knutson D. W. (1974) Radiographic studies of reef coral exoskeletons: Rates and patterns of coral growth. *J. exp. mar. Biol. Ecol.* **14**, 179-200.
- Charles C. D., Hunter D. E., & Fairbanks R. G. (1997) Interaction between the ENSO and the Asian monsoon in a coral record of tropical climate. *Science* **277**, 925-928.
- Chen J. H., Edwards R. L., & Wasserburg G. J. (1986)  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$  in seawater. *Earth and Planetary Science Letters* **80**, 241-251.
- Christ C. L., Clark J. R., & Evans J. H. T. (1955) Crystal structure of rutherfordine,  $\text{UO}_2\text{CO}_3$ . *Science* **121**, 472-473.
- Clapperton C. M., Sugden D. E., Birnie J., & Wilson M. J. (1989) Late-glacial and Holocene glacier fluctuations and environmental change on South Georgia, Southern Ocean. *Quaternary Research (New York)* **31**, 210-228.
- Cochran J. K. (1992) The oceanic chemistry of the uranium- and thorium-series nuclides.; 2. In *Uranium-series disequilibrium; applications to Earth, marine, and environmental sciences.* (ed. M. Ivanovich & R. S. Harmon), pp. 334-395. Clarendon Press.
- Crowley T. J., Quinn T. M., Taylor F. W., Henin C., & Joannot P. (1997) Evidence for a volcanic cooling signal in a 335-year coral record from New Caledonia. *Paleoceanography* **12**, 633-639.
- de Bièvre P. & Taylor P. D. P. (1993) Table of isotopic compositions of the elements. *Int. J. Mass Spectrom. Ion Processes* **123**, 149-166.
- de Villiers S., Nelson B. K., & Chivas A. R. (1995) Biological controls on coral Sr / Ca and  $\delta^{18}\text{O}$  reconstructions of sea surface temperatures. *Science* **269**, 1247-1249.
- de Villiers S., Shen G. T., & Nelson B. K. (1994) The Sr / Ca-temperature relationship in coralline aragonite: Influence of variability in  $(\text{Sr} / \text{Ca})_{\text{seawater}}$  and skeletal growth parameters. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **58**, 197-208.
- Dietzel M. & Usdowski E. (1996) Coprecipitation of  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ , and  $\text{Mn}^{2+}$  with galena and covellite, and of  $\text{Sr}^{2+}$  with calcite during crystallization via diffusion of  $\text{H}_2\text{S}$  and  $\text{CO}_2$  through polyethylene at 20°C: Power law and Nernst law control of trace element partitioning. *Chemical Geology* **131**, 55-65.
- Djogic R., Kniewald G., & Branica M. (1988) Uranium in the marine environment; a geochemical approach to its hydrologic and sedimentary cycle. In *Radionuclides; a tool for oceanography.* (ed. J. C. Guary, P. Guegueniat, & R. J. Pentreath), pp. 171-182. Elsevier Appl. Sci. Publ.

- Dutton E. G. & Christy J. R. (1992) Solar radiative forcing at selected locations and evidence for global lower tropospheric cooling following the eruption of El Chichon and Pinatubo. *Geophysical Research Letters* **19**, 2313-2316.
- Epstein S., Buchsbaum R., Lowenstam H., & Urey H. (1953) Revised carbonate-water isotopic temperature scale. *Geol. Soc. Am. Bull.* **64**, 1315-1325.
- Epstein S. & Mayeda T. (1953) Variation of O18 content of waters from natural sources. *Geochim. Cosmochim. Acta* **4**, 213-224.
- Fairbanks R. G. & Dodge R. E. (1979) Annual periodicity of the  $^{18}\text{O} / ^{16}\text{O}$  and  $^{13}\text{C} / ^{12}\text{C}$  ratios in the coral *Montastrea annularis*. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **43**, 1009-1020.
- Gagan M. K., Ayliffe L. K., Hopley D., Cali J. A., Mortimer G. E., Chappell J., McCulloch M. T., & Head M. J. (1998) Temperature and surface-ocean water balance of the mid-Holocene tropical western Pacific. *Science* **279**, 1014-1018.
- Gagan M. K. & Chivas A. R. (1995) Oxygen isotopes in Western Australian coral reveal Pinatubo aerosol-induced cooling in the western Pacific warm pool. *Geophysical Research Letters* **22**, 1069-1072.
- Godfrey J. S. (1996) The effect of the Indonesian throughflow on ocean circulation and heat exchange with the atmosphere: a review. *J. Geophys. Res.* **C 101**, 12217-12237.
- Goldberg E. D., Backer M., & Fox D. L. (1952) Microfiltration in oceanographic research. *J. Mar. Res.* **11**, 194-204.
- Guilderson T. P., Fairbanks R. G., & Rubenstone J. L. (1994) Tropical temperature variations since 20,000 years ago; modulating interhemispheric climate change. *Science* **263**, 663-665.
- Guillaume M. (1988) La croissance du squelette de *Porites lutea*, scléractinaire hermatypique, sur la recif frangeant de La Saline, Ile de La Réunion, Océan Indien. *Ph. D. thesis, Université d'Aix-Marseille II*.
- Hammer C. U., Clausen H. B., & Langway C. C., Jr. (1994) Electrical conductivity method (ECM) stratigraphic dating of the Byrd Station ice core, Antarctica. In *Proceedings of the Fifth international symposium on Antarctic glaciology*, Vol. 20 (ed. Anonymous), pp. 115-120. International Glaciological Society.
- Hatcher B. G. (1991) Coral reefs in the Leeuwin Current - an ecological perspective. *J. R. Soc. W. Austr.* **74**, 115-127.
- Hearn C. J., Hatcher B. G., Masini R. J., & Simpson C. J. (1986) Oceanographic processes on the Ningaloo Reef, Western Australia. *Centre for Environmental Fluid Dynamics, University of Western Australia, Report ED-86-171, Perth, 121 pp.*

- Heiss G. A. (1994) Coral reefs in the Red Sea: Growth, production and stable isotopes. *GEOMAR Report* **32**, 1-141.
- Heiss G. A., Camoin G. F., Eisenhauer A., Wischow D., Dullo W.-C., & Hansen B. (1997) Stable isotope and Sr/Ca-signals in corals from the Indian Ocean. *Proceedings of the 8th international coral reef symposium* **2**, 1713-1718.
- Heiss G. A., Dullo W.-C., & Reijmer J. J. G. (1993) Short- and long-term growth history of massive *Porites* sp. from Aqaba (Red Sea). *Senckenbergiana maritima* **23**, 135-141.
- Hodell D. A., Mead G. A., & Mueller P. A. (1990) Variation in the strontium isotopic composition of seawater (8 Ma to present); implications for chemical weathering rates and dissolved fluxes to the oceans. *Chemical Geology; Isotope Geoscience Section* **80**, 291-307.
- Hope G. S. & Peterson J. A. (1976) Palaeoenvironments. In *The equatorial glaciers of New Guinea; results of the 1971-1973 Australian universities' expeditions to Irian Jaya; survey, glaciology, meteorology, biology and palaeoenvironments*. (ed. G. S. Hope, J. A. Peterson, U. Radok, & I. Allison), pp. 173-205. A. A. Balkema.
- Hudson J. H., Shinn E. A., Halley R. B., & Lidz B. (1976) Sclerochronology; a tool for interpreting past environments. *Geology* **4**, 361-364.
- Imbrie J. & Kipp N. G. (1971) A new micropaleontological method for quantitative paleoclimatology; application to a late Pleistocene Caribbean core. In *The late Cenozoic glacial ages.*, pp. 71-147. Yale Univ.
- Johnsen S. J., Clausen H. B., Dansgaard W., Fuhrer K., Gundestrup N., Hammer C. U., Iversen P., Jouzel J., Stauffer B., & Steffensen J. P. (1992) Irregular glacial interstadials recorded in a new Greenland ice core. *Nature* **359**, 311-313.
- Johnsen S. J., Dahl-Jensen D., Dansgaard W., & Gundestrup N. (1995) Greenland palaeotemperatures derived from GRIP bore hole temperature and ice core isotope profiles. *Tellus, Series B* **47B**, 624-629.
- Jones P. D. (1994) Recent warming in global temperature series. *Geophysical Research Letters* **21**, 1149-1152.
- Jouzel J., Barkov N. I., Barnola J. M., Bender M., Chappellaz J., Genthon C., Kotlyakov V. M., Lipenkov V., Lorius C., Petit J. R., Raynaud D., Raisbeck G., Ritz C., Sowers T., Stievenard M., Yiou F., & Yiou P. (1993) Extending the Vostok ice-core record of palaeoclimate to the penultimate glacial period. **364**, 407-412.
- Jouzel J., Lorius C., Petit J. R., Genthon C., Barkov N. I., Kotlyakov V. M., & Petrov V. M. (1987) Vostok ice core; a continuous isotope temperature record over the last climatic cycle (160,000 years). *Nature* **329**, 403-408.

- Jouzel J., Vaikmae R., Petit J. R., Martin M., Duclos Y., Stievenard M., Lorius C., Toots M., Melieres M. A., Burckle L. H., Barkov N. I., & Kotlyakov V. M. (1995) The two-step shape and timing of the last deglaciation in Antarctica. *Climate Dynamics* **11**, 151-161.
- Kinsman D. J. J. & Holland H. D. (1969) The co-precipitation of cations with  $\text{CaCO}_3$ -IV. The co-precipitation of  $\text{Sr}^{2+}$  with aragonite between 16° and 96°C. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **33**, 1-17.
- Knutson D. W., Buddemeier R. W., & Smith S. V. (1972) Coral Chronometers; Seasonal Growth Bands in Reef Corals. *Science* **177**, 270-272.
- Kobluk D. R. and Risk M. J. (1977) Calcification of exposed filaments of endolithic algae, micrite envelope formation and sediment production. *Journal of Sedimentary Petrology* **47**, 517-528.
- Ku T. L., Knauss K. G., & Mathieu G. G. (1977) Uranium in the open ocean: Concentration and isotopic composition. *Deep-Sea Res.* **24**, 1005-1017.
- Lanius K. (1995) *Die Erde im Wandel: Grenzen des Vorhersagbaren*. Spektrum, Akad. Verl. Heidelberg, Berlin, Oxford.
- Lea D. W. & Boyle E. A. (1993) Determination of carbonate-bound barium in foraminifera and corals by isotope dilution plasma-mass spectrometry. *Chemical Geology* **103**, 73-84.
- Linn L. J., Delaney M. L., & Druffel E. R. M. (1990) Trace metals in contemporary and seventeenth-century Galapagos coral; records of seasonal and annual variations. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **54**, 387-394.
- Logan A. & Tomascik T. (1991) Extension growth rates in two coral species from high-latitude reefs of Bermuda. *Coral Reefs* **10**, 155-160.
- Lukas R. & Lindstrom E. (1991) The mixed layer of the western Equatorial Pacific Ocean. *J. Geophys. Res.* **96**, 3343-3357.
- McCorkle D. C., Veeh H. H., & Heggie D. T. (1993) Glacial-Holocene paleoproductivity off Western Australia; a comparison of proxy records. In *Carbon cycling in the glacial ocean; constraints on the ocean's role in global change; quantitative approaches in paleoceanography.*, Vol. 17 (ed. R. Zahn, T. F. Pedersen, M. A. Kaminski, & L. Labeyrie), pp. 443-479. Springer Verlag.
- McCulloch M., Mortimer G., Esat T., Li X., Pillans B., & Chappell J. (1996) High resolution windows into early Holocene climate; Sr/ Ca coral records from the Huon Peninsula. *Earth and Planetary Science Letters* **138**, 169-178.

- McCulloch M. T., Gagan M. K., Mortimer G. E., Chivas A. R., & Isdale P. J. (1994) A high-resolution Sr / Ca and  $\delta^{18}\text{O}$  coral record from the Great Barrier Reef, Australia, and the 1982-1983 El Nino. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **58**, 2747-2754.
- McGlone M. S., Kershaw A. P., & Markgraf V. (1994) El Niño: Historical and Paleoclimatic Aspects of the Southern Oscillation. *H. F. Diaz & Markgraf, V., Eds. (Cambridge Univ. Press, New York, pp. 435-462.*
- Members C. P. (1981) Seasonal Reconstructions of the Earth's Surface at the Last Glacial Maximum. *Map and Chart Ser., MC-36, Geol. Soc. Am.*
- Members C. P. (1994) CLIMAP 18K Database. IGBP PAGES/ World Data Center-A for Paleoclimatology Data Contribution Series # 94-001. *NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA.*
- Menard H. W. & Smith S. M. (1966) Hypsometry of ocean basin provinces. *Journal of Geophysical Research* **71**, 4305-4325.
- Michaels A. F. (1988) Vertical distribution and abundance of acantharia and their symbionts. *Mar. Biol.* **97**, 559-569.
- Millero F. J., Byrne R. H., Wanninkhof R., Feely R., Clayton T., Murphy P., & Lamb M. F. (1993) The internal consistency of  $\text{CO}_2$  measurements in the Equatorial Pacific. *Marine Chemistry* **44**, 269-280.
- Min G. R., Edwards R. L., Taylor F. W., Recy J., Gallup C. D., & Beck J. W. (1995) Annual cycles of U / Ca in coral skeletons and U / Ca thermometry. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **59**, 2025-2042.
- Mitsuguchi T., Matsumoto E., Abe O., Uchida T., & Isdale P. J. (1996) Mg / Ca thermometry in coral skeletons. *Science* **274**, 961-963.
- Müller P. J., Kirst G., Ruhland G., von S. I., & Rosell M. A. (1998) Calibration of the alkenone paleotemperature index  $U_{37}^k$  based on core-tops from the eastern South Atlantic and the global ocean (60°N-60°S). *Geochimica et Cosmochimica Acta* **62**, 1757-1772.
- Nürnberg D., Bijma J., & Hemleben C. (1996) Assessing the reliability of magnesium in foraminiferal calcite as a proxy for water mass temperatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **60**, 803-814.
- Opdyke B. N., Walter L. M., & Huston T. J. (1993) Fluoride content of foraminiferal calcite; relations to life habitat, oxygen isotope composition, and minor element chemistry. *Geology* **21**, 169-172.
- Paetzold J. (1984) Growth rhythms recorded in stable isotopes and density bands in the reef coral *Porites lobata* (Cebu, Philippines). *Coral Reefs* **3**, 87-90.

- Palmer M. R. & Edmond J. M. (1989) The strontium isotope budget of the modern ocean. *Earth and Planetary Science Letters* **92**, 11-26.
- Palmer M. R. & Edmond J. M. (1993) Uranium in river water. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **57**, 4947-4955.
- Palmer M. R. & Elderfield H. (1985) Sr isotope composition of sea water over the past 75 Myr. *Nature* **314**, 526-528.
- Patrick A. & Thunell R. C. (1997) Tropical Pacific sea surface temperatures and upper water column thermal structure during the last glacial maximum. *Paleoceanography* **12**, 649-657.
- Pattiaratchi C. B. & Buchan S. J. (1991) Implications of long-term climate change for the Leeuwin Current. *Journal of the Royal Society of Western Australia* **74**, 133-140.
- Pearce A. (1997) The Leeuwin Current and the Houtman Abrolhos Islands. - In: Wells, F. E. (Hrsg.): The marine flora and fauna of the Houtman Abrolhos Islands, Western Australia. *Western Australian Museum, Perth*, 11-46.
- Pilson M. E. Q. (1998) *An Introduction to the chemistry of the sea. Upper Saddle River, N.J. : Prentice Hall.*
- Pisias N. G. & Mix A. C. (1997) Spatial and temporal oceanographic variability of the eastern Equatorial Pacific during the late Pleistocene; evidence from Radiolaria microfossils. *Paleoceanography* **12**, 381-393.
- Pisias N. G., Roelofs A., & Weber M. (1997) Radiolarian-based transfer functions for estimating mean surface ocean temperatures and seasonal range. *Paleoceanography* **12**, 365-379.
- Reynolds R. W. & Smith T. M. (1994) Improved global sea surface temperature analysis. *J. Clim.* **7**, 929-948.
- Rimstidt J. D., Balog A., & Webb J. (1998) Distribution of trace elements between carbonate minerals and aqueous solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **62**, 1851-1863.
- Rind D. & Peteet D. M. (1985) Terrestrial conditions at the last glacial maximum and CLIMAP sea-surface temperature estimates; are they consistent? *Quaternary Research* **24**, 1-22.
- Rosell-Melé A. (1998) Project takes a new look at past sea surface temperatures. *Eos, Trans. AGU* **79**, 393-394.
- Rosenthal Y. & Boyle E. A. (1993) Factors controlling the fluoride content of planktonic foraminifera; an evaluation of its paleoceanographic applicability. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **57**, 335-346.

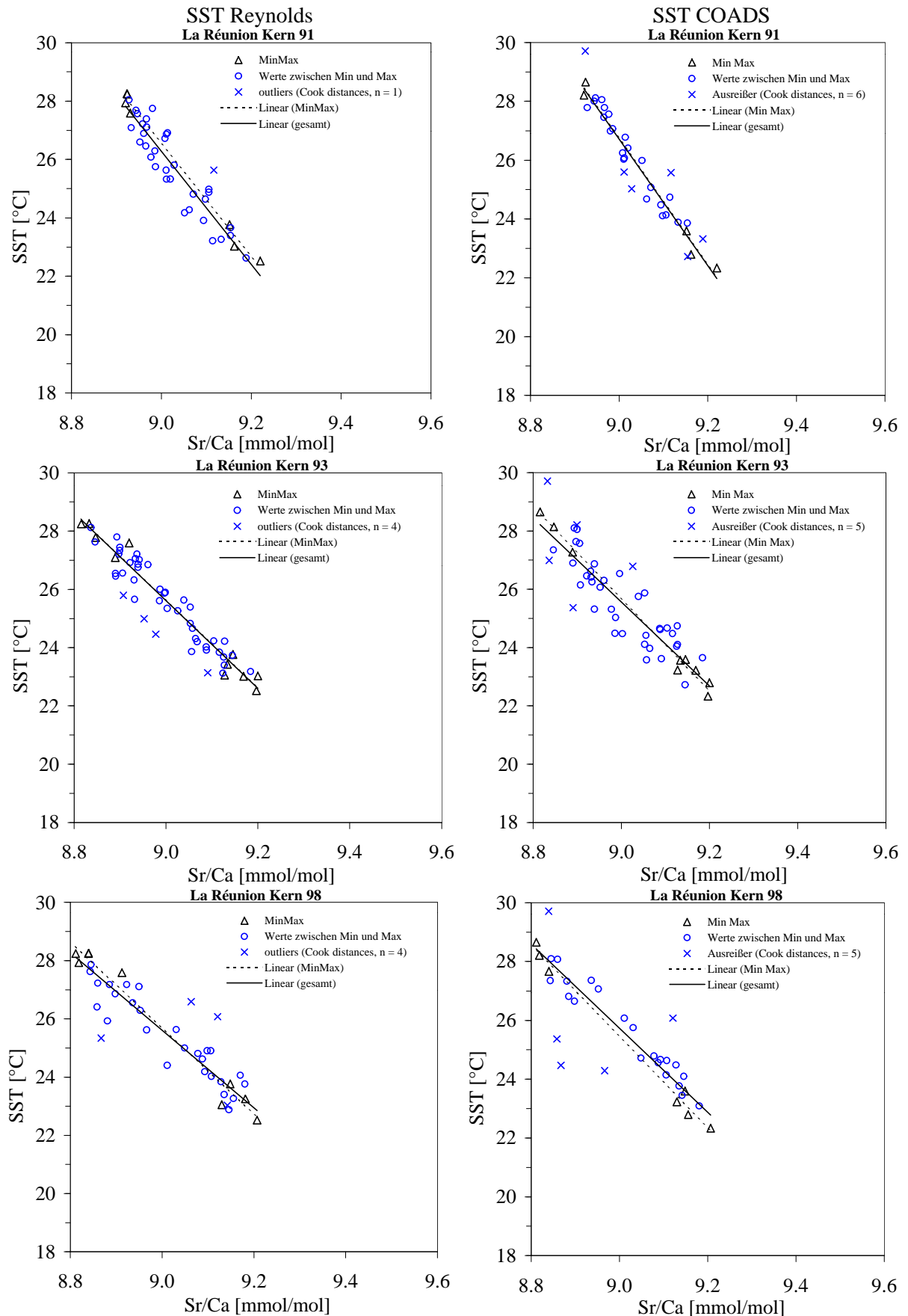
- Rosenthal Y., Boyle E. A., & Slowey N. C. (1997) Temperature control on the incorporation of magnesium, strontium, fluorine, and cadmium into benthic foraminiferal shells from Little Bahama Bank; prospects for thermocline paleoceanography. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **61**, 3633-3643.
- Scherer M. (1974) The influence of two endolithic micro-organisms on the diagenesis of recent coral skeletons. *Neues Jahrbuch fuer Geologie und Palaeontologie. Monatshefte* **9**, 557-566.
- Shackleton N. J. (1987) Oxygen isotopes, ice volume and sea level. *Quaternary Science Reviews* **6**, 183-190.
- Shen C. C., Lee T., Chen C. Y., Wang C. H., Dai Chang F., & Li Lung A. (1996) The calibration of D[Sr / Ca] versus sea surface temperature relationship for *Porites* corals. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **60**, 3849-3858.
- Shen G. T. & Boyle E. A. (1988) Determination of lead, cadmium and other trace metals in annually-banded corals. *Chemical Geology* **67**, 47-62.
- Shen G. T. & Dunbar R. B. (1995) Environmental controls on uranium in coral reefs. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **59**, 2009-2024.
- Sinclair D. J., Kinsley L. P. J., & McCulloch M. T. (1998) High resolution analysis of trace elements in corals by laser ablation ICP-MS. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **62**, 1889-1901.
- Sowers T. & Bender M. (1995) Climate records covering the last deglaciation. *Science* **269**, 210-214.
- Spencer R. W. & Christy J. R. (1990) Precise monitoring of global temperature trends from satellites. *Science* **247**, 1558-1562.
- Stute M., Forster M., Frischkorn H., Serejo A., Clark J. F., Schlosser P., Broecker W. S., & Bonani G. (1995) Cooling of Tropical Brazil (5°C) During the Last Glacial Maximum. *Science* **269**, 379-383.
- Swart P. K. (1980) The environmental geochemistry of scleractinian corals: An experiment study of trace element and stable isotope incorporation. *Ph.D. thesis, Univ. London*.
- Swart P. K. & Hubbard J. A. (1982) Uranium in scleractinian coral skeletons. *Coral Reefs* **1**, 13-19.
- Thompson L. G., Mosley T. E., Davis M. E., Lin P. N., Henderson K. A., Cole D. J., Bolzan J. F., & Liu K. B. (1995) Late Glacial Stage and Holocene tropical ice core records from Huscaran, Peru. *Science* **269**, 46-50.
- Thompson R. O. R. Y. (1984) Observations of the Leeuwin current off Western Australia. *J. Phys. Oceanogr.* **14**, 623-628.

- Uzdowski H.-E. (1975) *Fraktionierung der Spurenelemente bei der Kristallisation*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 104 pp.
- Weber J. N. (1973) Incorporation of strontium into reef coral skeletal carbonate. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **37**, 2173-2190.
- Wefer G. & Berger W. H. (1991) Isotope paleontology: growth and composition of extant calcareous species. *Marine Geology* **100**, 207-248.
- Winter A., Goenaga C., & Maul G. A. (1991) Carbon and oxygen isotope time series from an 18-year Caribbean reef coral. *Journal of Geophysical Research* **96**, 16673-16678.
- Yan X.-H., Ho C.-R., Zheng Q., & Klemas V. (1992) Temperature and Size Variabilities of the Western Pacific Warm Pool. *Science* **258**, 1643-1645.
- Zhao M., Beveridge N. A. S., Shackleton N. J., Sarnthein M., & Eglinton G. (1995) Molecular stratigraphy of cores off Northwest Africa; sea surface temperature history over the last 80 ka. In *The biogeochemical ocean flux study.*, Vol. 10 (ed. Anonymous), pp. 661-675. American Geophysical Union.

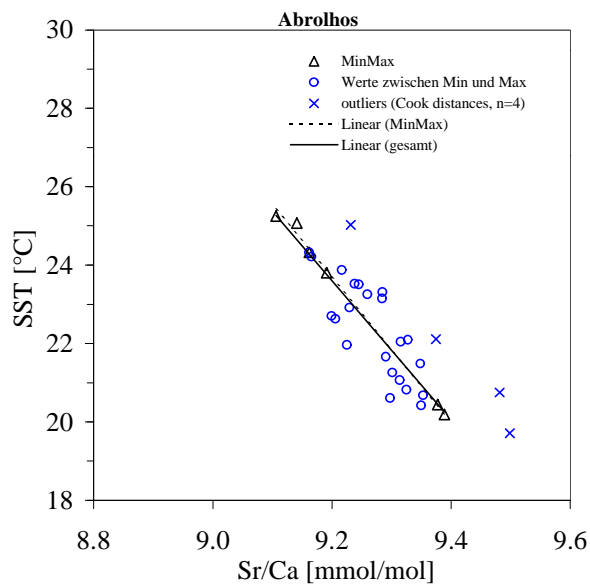


## 10 Anhang

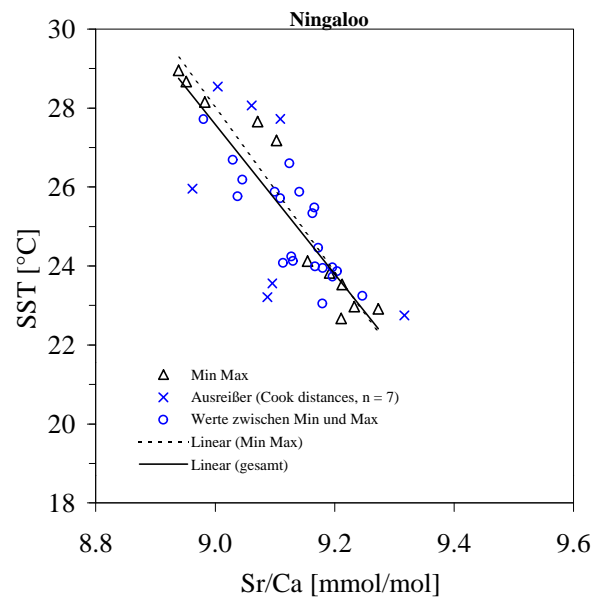
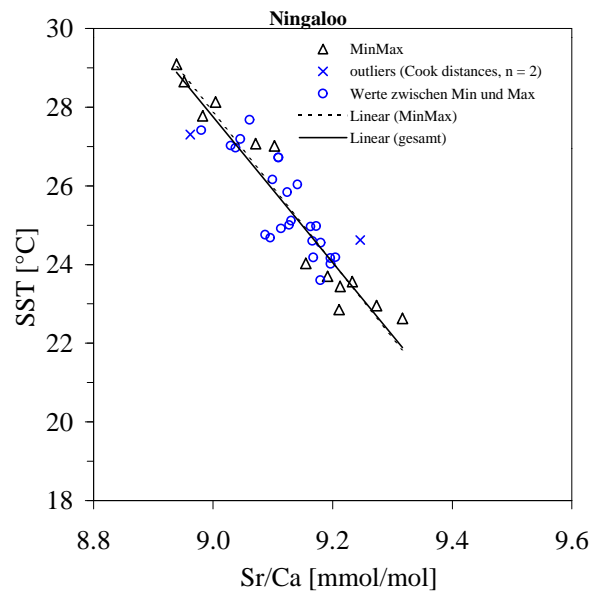
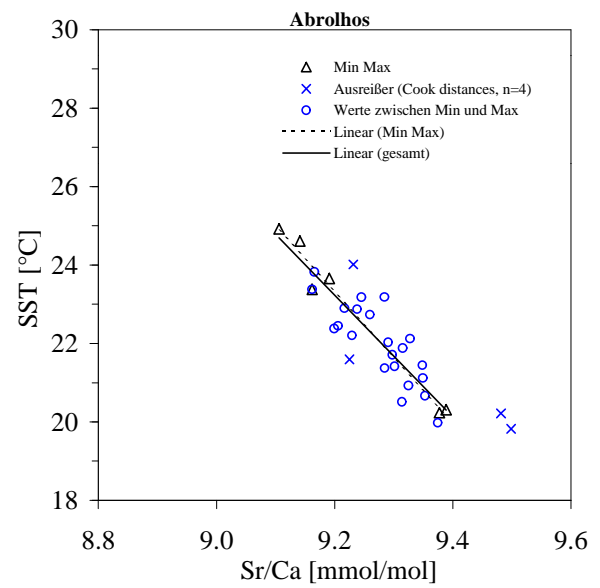
### 10.1 Sr/Ca vs. Reynolds- und COADS-SST der untersuchten rezenten Kerne



## SST Reynolds



## SST COADS



## 10.2 Sr/Ca-, U/Ca- und SST-Daten

LR91, LR93, LR98 = Probenkerne der Lokalität La Réunion; 1o = Probenkern der Lokalität Abrolhos Island; T2 = Probenkern der Lokalität Ningaloo Reef, N-2-5 und N2-16P = fossile Kerne (5 ka und 117 ka) der Lokalität Ningaloo Reef

Probe	Sr/Ca [mmol/mol]	Fehler 2 $\sigma$	U/Ca [ $\mu$ mol/mol]	Fehler 2 $\sigma$	SST NCEP	SST Sr/Ca	SST U/Ca
LR91 001	9.3673	0.0014					
LR91 002	9.2306	0.0009					
LR91 003	9.1059	0.0009			24.87	24.51	
LR91 004	8.9874	0.0007			25.75	26.79	
LR91 005	8.9525	0.0009			26.59	27.46	
LR91 006	8.9332	0.0006			27.09	27.84	
LR91 007	8.9312	0.0008			27.59	27.87	
LR91 008	8.9582	0.0009			27.22	27.35	
LR91 009	8.9675	0.0009			27.11	27.17	
LR91 010	8.9859	0.0011			26.29	26.82	
LR91 011	9.0715	0.0011			24.81	25.17	
LR91 012	9.1540	0.0011			23.39	23.59	
LR91 013 a	9.1625	0.0008			23.03	23.42	
LR91 014	9.1334	0.0007			23.26	23.98	
LR91 015	9.1169	0.0009			25.63	24.30	
LR91 016	9.0142	0.0010			26.91	26.28	
LR91 017	8.9205	0.0009			27.93	28.08	
LR91 018	8.9468	0.0010			27.57	27.57	
LR91 019	8.9611	0.0007			26.89	27.30	
LR91 020	8.9771	0.0009			26.08	26.99	
LR91 021	9.0202	0.0009			25.33	26.16	
LR91 022	9.0518	0.0008			24.17	25.55	
LR91 023	9.1146	0.0027			23.21	24.34	
LR91 024	9.1890	0.0011			22.63	22.91	
LR91 025	9.2205	0.0009			22.52	22.31	
LR91 026	9.1545	0.0009			23.66	23.58	
LR91 027	9.0984	0.0009			24.64	24.66	
LR91 028	9.0285	0.0006			25.80	26.00	
LR91 029	9.0081	0.0009			26.72	26.39	
LR91 030	8.9805	0.0007			27.75	26.93	
LR91 031	8.9237	0.0009			28.25	28.02	
LR91 032	8.9439	0.0011			27.68	27.63	
LR91 033	8.9656	0.0010			26.46	27.21	
LR91 034	9.0119	0.0009			25.32	26.32	
LR91 035	9.0626	0.0008			24.27	25.34	
LR91 036	9.0944	0.0008			23.91	24.73	
LR91 037	9.1522	0.0009			23.76	23.62	
LR91 038	9.1061	0.0007			24.98	24.51	
LR91 039	9.0114	0.0008			26.86	26.33	
LR91 040	8.9246	0.0011			28.24	28.00	
LR91 041	8.9282	0.0008			28.04	27.93	
LR91 042	8.9671	0.0010			27.38	27.18	
LR91 043	9.0107	0.0008			25.63	26.34	

Probe	Sr/Ca [mmol/mol]	Fehler 2 $\sigma$	U/Ca [ $\mu$ mol/mol]	Fehler 2 $\sigma$	SST NCEP	SST Sr/Ca	SST U/Ca
LR93 001	9.1237	0.0010			23.12	23.76	
LR93 002	9.0678	0.0007			24.20	24.60	
LR93 003	8.9986	0.0007			25.89	25.65	
LR93 004	8.9196	0.0007			27.59	26.85	
LR93 005	8.9369	0.0009			27.21	26.59	
LR93 006	8.9422	0.0008			27.02	26.51	
LR93 007	9.0530	0.0010			25.39	24.83	
LR93 008	9.1255	0.0010			23.68	23.73	
LR93 009	9.1998	0.0006			23.03	22.60	
LR93 010	9.1841	0.0007			23.18	22.84	
LR93 011	9.0881	0.0014			23.92	24.30	
LR93 012	8.9963	0.0011			25.87	25.69	
LR93 013	8.9391	0.0010			26.76	26.55	
LR93 014	8.8993	0.0008			27.33	27.16	
LR93 015	8.8998	0.0008			27.44	27.15	
LR93 016	8.9315	0.0006			25.66	26.67	
LR93 017	9.1270	0.0010			23.40	23.71	
LR93 018	9.1966	0.0009			22.52	22.65	
LR93 019	9.1449	0.0011			23.73	23.44	
LR93 020	9.0529	0.0007			24.83	24.83	
LR93 021	8.9872	0.0008			26.00	25.83	
LR93 022	8.9335	0.0009			27.06	26.64	
LR93 023	8.8364	0.0009			28.12	28.11	
LR93 024	8.8325	0.0009			28.26	28.17	
LR93 025	8.9056	0.0008			26.55	27.06	
LR93 026	8.9523	0.0008			24.99	26.35	
LR93 027	9.0873	0.0006			24.02	24.31	
LR93 028	9.1456	0.0008			23.76	23.43	
LR93 029	9.1039	0.0008			24.23	24.06	
LR93 030	9.0027	0.0009			25.34	25.59	
LR93 031	8.8904	0.0007			26.45	27.29	
LR93 032	8.8459	0.0007			27.63	27.96	
LR93 033	8.8156	0.0007			28.24	28.42	
LR93 034	8.8932	0.0007	1.12	0.0050	27.80	27.25	26.47
LR93 035	9.0390	0.0009	1.19	0.0047	25.63	25.04	24.85
LR93 036	9.1162	0.0008	1.24	0.0052	23.84	23.87	23.64
LR93 037	9.1277	0.0006	1.24	0.0059	23.05	23.70	23.63
LR93 038	9.0645	0.0009	1.20	0.0054	24.31	24.65	24.49
LR93 039	8.9859	0.0008	1.15	0.0049	25.61	25.84	25.71
LR93 040	8.9391	0.0007	1.15	0.0049	26.86	26.55	25.69
LR93 041	8.9216	0.0007	1.13	0.0051	26.92	26.82	26.25
LR93 042	8.8893	0.0007	1.10	0.0025	27.09	27.31	27.03
LR93 043	8.9305	0.0005	1.12	0.0039	26.32	26.68	26.43
LR93 044	9.0258	0.0008	1.18	0.0039	25.26	25.24	25.16
LR93 045	9.1278	0.0007	1.26	0.0046	24.22	23.70	23.18
LR93 046	9.1687	0.0010	1.27	0.0050	23.02	23.08	22.98
LR93 047	9.0909	0.0007	1.24	0.0059	23.14	24.25	23.68
LR93 048	9.0561	0.0007	1.19	0.0045	23.86	24.78	24.92
LR93 049	8.9777	0.0007	1.14	0.0049	24.46	25.97	25.990
LR93 050	8.9073	0.0007	1.09	0.0035	25.79	27.03	27.09
LR93 051	8.8902	0.0008	1.10	0.0040	26.55	27.29	26.89
LR93 052	8.8972	0.0008	1.10	0.0047	27.21	27.19	26.89
LR93 053	8.8469	0.0006	1.07	0.0083	27.78	27.95	27.75
LR93 054	8.9609	0.0008	1.16	0.0046	26.85	26.22	25.54

Probe	Sr/Ca [mmol/mol]	Fehler 2 $\sigma$	U/Ca [ $\mu$ mol/mol]	Fehler 2 $\sigma$	SST NCEP	SST Sr/Ca	SST U/Ca
LR93 055	9.0575	0.0006	1.23	0.0055	24.66	24.76	23.86
LR93 056	9.1339	0.0009	1.27	0.0062	23.42	23.60	22.97
LR93 121	9.1147	0.0007				23.89	
LR93 120	9.0269	0.0006				25.22	
LR93 119	8.9783	0.0005				25.96	
LR93 118	9.0024	0.0006				25.59	
LR93 117	8.9535	0.0006				26.34	
LR93 116	9.0858	0.0005				24.33	
LR93 115	9.1487	0.0006				23.38	
LR93 114	9.1654	0.0005				23.13	
LR93 113	9.1638	0.0006				23.15	
LR93 112	9.1006	0.0005				24.11	
LR93 111	9.0854	0.0011				24.34	
LR93 110	9.0580	0.0006				24.75	
LR93 109	9.1594	0.0008				23.22	
LR93 108	9.0568	0.0005				24.77	
LR93 107	9.0461	0.0006				24.93	
LR93 106	9.1781	0.0006				22.93	
LR93 105	9.2235	0.0006				22.25	
LR93 104	9.2802	0.0007				21.39	
LR93 103	9.2683	0.0007				21.57	
LR93 102	9.1348	0.0005				23.59	
LR93 101	9.1087	0.0007				23.98	
LR93 100	8.9878	0.0003				25.82	
LR93 099	9.0270	0.0006				25.22	
LR93 098	9.0396	0.0007				25.03	
LR93 097	9.0517	0.0006				24.85	
LR93 096	9.1236	0.0007				23.76	
LR93 095	9.1955	0.0007				22.67	
LR93 094	9.2283	0.0007				22.17	
LR93 093	9.1606	0.0006				23.20	
LR93 092	9.1642	0.0006				23.14	
LR93 091	9.2040	0.0006				22.54	
LR93 090	9.0267	0.0008				25.23	
LR93 089	9.0338	0.0006				25.12	
LR93 088	8.9618	0.0006				26.21	
LR93 087	9.0370	0.0006				25.07	
LR93 086	9.0891	0.0006				24.28	
LR93 085	9.2195	0.0007				22.31	
LR93 084	9.2490	0.0007				21.86	
LR93 083	9.1724	0.0007				23.02	
LR93 082	9.0951	0.0008				24.19	
LR93 080	8.9782	0.0006				25.77	
LR93 081	8.9907	0.0006				25.96	
LR93 079	8.9468	0.0007	1.12	0.0050		26.44	26.44
LR93 078	9.0085	0.0006	1.15	0.0047		25.50	25.82
LR93 077	9.0757	0.0008	1.22	0.0046		24.49	24.14
LR93 076	9.1859	0.0007	1.25	0.0069		22.82	23.26
LR93 075	9.2285	0.0007	1.28	0.0058		22.17	22.60
LR93 074	9.1169	0.0009	1.31	0.0064		23.86	21.92
LR93 073	9.0043	0.0008	1.15	0.0062		25.57	25.69
LR93 072	8.9639	0.0007	1.13	0.0048		26.18	26.21

Probe	Sr/Ca [mmol/mol]	Fehler 2 $\sigma$	U/Ca [ $\mu$ mol/mol]	Fehler 2 $\sigma$	SST NCEP	SST Sr/Ca	SST U/Ca
LR93 071	8.9196	0.0008	1.12	0.0051		26.85	26.41
LR93 070	8.9786	0.0005	1.15	0.0048		25.95	25.72
LR93 069	9.0329	0.0006	1.18	0.0062		25.13	24.99
LR93 068	9.1689	0.0006	1.27	0.0064		23.07	22.95
LR93 067	9.2058	0.0006	1.28	0.0058		22.51	22.58
LR93 066	9.1442	0.0008	1.24	0.0069		23.45	23.70
LR93 065	9.0083	0.0005	1.16	0.0046		25.50	25.57
LR93 064	8.9384	0.0008	1.11	0.0047		26.56	26.62
LR93 063	8.8969	0.0008	1.10	0.0050		27.19	26.91
LR93 062	8.8839	0.0007	1.10	0.0051		27.39	27.02
LR93 061	8.9744	0.0006	1.16	0.0044		26.02	25.58
LR93 060	9.0685	0.0006	1.20	0.0056		24.59	24.47
LR98 001	9.1817	0.0008			23.25	22.99	
LR98 002	9.1708	0.0010			24.06	23.15	
LR98 003	9.0984	0.0008			24.90	24.23	
LR98 004	9.0634	0.0007			26.59	24.75	
LR98 005	8.9124	0.0011			27.59	26.99	
LR98 006	8.9229	0.0009			27.17	26.84	
LR98 007	8.9497	0.0010			27.11	26.44	
LR98 008	8.9524	0.0007			26.29	26.40	
LR98 009	9.0783	0.0009			24.81	24.53	
LR98 010	9.1353	0.0009			23.39	23.68	
LR98 011	9.1423	0.0007			23.03	23.57	
LR98 012	9.1558	0.0010			23.26	23.37	
LR98 013	8.9664	0.0009			25.62	26.19	
LR98 014	8.8983	0.0010			26.86	27.20	
LR98 015	8.8185	0.0010			27.93	28.39	
LR98 016	8.8599	0.0011			27.23	27.77	
LR98 017	8.8811	0.0016			25.93	27.46	
LR98 018	9.0113	0.0009			24.40	25.52	
LR98 019	9.1458	0.0009			22.88	23.52	
LR98 020	9.2070	0.0009			22.52	22.61	
LR98 021	9.1807	0.0011			23.76	23.00	
LR98 022	9.1062	0.0008			24.90	24.11	
LR98 023	9.1211	0.0010			26.07	23.89	
LR98 024	8.8852	0.0007			27.17	27.40	
LR98 025	8.8398	0.0009			28.25	28.07	
LR98 026	8.8400	0.0010			28.26	28.07	
LR98 027	8.9363	0.0009			26.55	26.64	
LR98 028	9.0491	0.0008			24.99	24.96	
LR98 029	9.1076	0.0008			24.02	24.09	
LR98 030	9.1485	0.0011			23.76	23.48	
LR98 031	9.0933	0.0010			24.18	24.30	
LR98 032	8.8675	0.0008			25.34	27.66	
LR98 033	8.8583	0.0007			26.41	27.80	
LR98 034	8.8435	0.0012			27.63	28.02	
LR98 035	8.8117	0.0009			28.24	28.49	
LR98 036	8.8454	0.0007			27.86	27.99	
LR98 037	9.0310	0.0011			25.63	25.23	
LR98 038	9.1285	0.0008			23.84	23.78	
LR98 039	9.1302	0.0009			23.05	23.75	
LR98 040	9.0879	0.0009			24.62	24.38	

Probe	Sr/Ca [mmol/mol]	Fehler 2 $\sigma$	U/Ca [ $\mu$ mol/mol]	Fehler 2 $\sigma$	SST NCEP	SST Sr/Ca	SST U/Ca
1o-17b	9.328	0.00089			22.09	21.34	
1o-17c	9.284	0.00080			23.15	22.14	
1o-17	9.191	0.00069	1.20	0.0060	23.81	23.85	23.97
1o-16a	9.245	0.00069			23.51	22.86	
1o-16b	9.260	0.00063			23.25	22.59	
1o-16c	9.291	0.00073			21.66	22.02	
1o-16	9.350	0.00076			20.42	20.93	
1o-15a	9.389	0.00061	1.31	0.0052	20.19	20.21	20.25
1o-15b	9.314	0.00065			21.06	21.59	
1o-15c	9.229	0.00098			22.92	23.15	
1o-15	9.162	0.00092	1.19	0.0031	24.33	24.39	24.16
1o-14a	9.206	0.00065			22.63	23.58	
1o-14b	9.298	0.00066			20.61	21.89	
1o-14	9.499	0.00092	1.35	0.0063	19.71	18.19	19.18
1o-13a	9.482	0.00122			20.75	18.50	
1o-13b	9.375	0.00079			22.11	20.48	
1o-13c	9.285	0.00077			23.31	22.13	
1o-13	9.217	0.00078			23.87	23.38	
1o-12a	9.141	0.00085	1.16	0.0036	25.07	24.77	25.10
1o-12b	9.238	0.00065			23.52	22.99	
1o-12c+	9.315	0.00069			22.05	21.57	
1o-12c	9.348	0.00062	1.27	0.0061	21.49	20.96	
1o-12d+	9.378	0.00074	1.29	0.0067	20.44	20.42	21.09
1o-12D	9.353	0.00089			20.68	20.87	
1o-12?	9.325	0.00080			20.82	21.38	
1o-11a+	9.302	0.00067			21.26	21.82	
1o-11a	9.225	0.00074			21.96	23.23	
1o-11b+	9.199	0.00081			22.70	23.70	
1o-11b	9.166	0.00066			24.22	24.32	
1o-11c+	9.232	0.00092			25.03	23.11	
1o-11c	9.106	0.00070	1.17	0.0046	25.25	25.42	24.98
T1-10	9.243	0.0005					
T1-11	9.317	0.0005	1.30	0.0033	22.63	21.84	22.19
T1-12	9.246	0.0007			24.62	23.18	
T1-13	9.103	0.0006	1.17	0.0082	27.02	25.91	27.31
T1-14	9.141	0.0006			26.03	25.18	
T1-15	9.163	0.0007			24.96	24.76	
T1-16	9.273	0.0008	1.30	0.0096	22.95	22.67	22.37
T2-1	9.173	0.0007			24.98	24.58	
T2-2	9.071	0.0007	1.18	0.0063	27.07	26.51	26.90
T2-3	9.124	0.0008			25.84	25.50	
T2-4	9.167	0.0005			24.18	24.68	
T2-5	9.233	0.0006	1.30	0.0085	23.57	23.43	22.35
T2-6	9.196	0.0007	1.26	0.0001	24.16	24.12	
T2-7	9.113	0.0006			24.92	25.70	
T2-8	9.030	0.0006	1.19	0.0058	27.02	27.30	
T2-9	9.004	0.0006	1.16	0.0069	28.13	27.78	27.63
T2-10	9.099	0.0010			26.16	25.97	
T2-11	9.204	0.0006	1.27	0.0065	24.18	23.97	
T2-12	9.211	0.0009	1.22	0.0047	22.85	23.85	25.37
T2-13	9.180	0.0004			24.55	24.43	
T2-14	9.038	0.0008			26.97	27.14	

Probe	Sr/Ca	Fehler	U/Ca	Fehler	SST	SST	SST
	[mmol/mol]	2 $\sigma$	[ $\mu$ mol/mol]	2 $\sigma$	NCEP	Sr/Ca	U/Ca
T2-15	8.982	0.0007	1.16	0.0041	27.78	28.19	27.95
T2-16	9.109	0.0008			26.72	25.79	
T2-17	9.166	0.0007	1.21	0.0052	24.59	24.70	
T2-18	9.192	0.0007	1.23	0.0054	23.70	24.21	24.89
T2-19	9.096	0.0007			24.68	26.04	
T2-20	8.980	0.0006			27.41	28.23	
T2-21	8.952	0.0007	1.16	0.0050	28.66	28.78	27.87
T2-22	9.045	0.0006			27.19	27.00	
T2-23	9.130	0.0007			25.11	25.38	
T2-24	9.155	0.0006	1.23	0.0053	24.03	24.91	24.83
T2-25	9.127	0.0007			25.00	25.44	
T2-26	8.962	0.0007			27.30	28.59	
T2-27	8.939	0.0009	1.16	0.0040	29.09	29.02	27.70
T2-28	9.109	0.0008			26.72	25.78	
T2-29	9.197	0.0006			24.02	24.12	
T2-30	9.212	0.0006	1.24	0.0049	23.44	23.82	24.76
T2-31	9.179	0.0005			23.60	24.45	
T2-32	9.087	0.0007			24.76	26.20	
T2-33	9.061	0.0005			27.68	26.70	
N2-5-2	9.177	0.0006	1.38	0.0066		24.37	18.77
N2-5-3	9.100	0.0006	1.25	0.0061		25.80	23.89
N2-5-4	9.069	0.0006	1.23	0.0066		26.37	24.73
N2-5-5	9.183	0.0006	1.31	0.0066		24.24	21.74
N2-5-6	9.229	0.0006	1.31	0.0064		23.39	21.53
N2-5-7	9.254	0.0005	1.38	0.0103		22.92	18.80
N2-5-8	9.244	0.0006	1.32	0.0071		23.10	21.26
N2-5-9	9.234	0.0008	1.29	0.0055		23.30	22.55
N2-5-10	9.215	0.0006	1.29	0.0069		23.64	22.47
N2-5-11	9.285	0.0007	1.31	0.0095		22.34	21.61
N2-5-12	9.191	0.0007	1.25	0.0054		24.11	24.17
N2-5-13	9.219	0.0006	1.29	0.0066		23.58	22.52
N2-5-14	9.216	0.0007	1.32	0.0109		23.63	21.26
N2-5-15	9.268	0.0005	1.35	0.0063		22.66	19.92
N2-5-16	9.321	0.0007	1.38	0.0067		21.66	19.00
N2-5-17	9.357	0.0007	1.40	0.0115		20.98	17.97
N2-5-18	9.324	0.0007	1.37	0.0099		21.61	19.50
N2-5-19	9.340	0.0007	1.41	0.0082		21.31	17.95
N2-5-20	9.313	0.0008	1.38	0.0077		21.82	18.74
N2-5-21	9.294	0.0006	1.39	0.0073		22.17	18.43
N2-5-22	9.262	0.0008	1.35	0.0084		22.77	20.10
N2-5-23	9.282	0.0007	1.36	0.0157		22.39	19.67
N2-5-24	9.306	0.0006	1.41	0.0091		21.95	17.88
N2-5-25	9.365	0.0023	1.46	0.0085		20.85	15.92
N2-5-26	9.274	0.0005	1.41	0.0076		22.54	17.76
N2-5-27	9.233	0.0007	1.34	0.0071		23.31	20.65
N2-5-28	9.215	0.0008	1.32	0.0068		23.64	21.36
N2-5-29	9.116	0.0006	1.28	0.0064		25.49	22.74
N2-5-30	9.304	0.0007	1.40	0.0067		21.98	18.09
N2-5-31	9.297	0.0007	1.40	0.0075		22.11	18.12
N2-5-32	9.359	0.0007	1.44	0.0073		20.95	16.61
N2-5-33	9.341	0.0007	1.46	0.0097		21.29	15.70
N2-5-34	9.346	0.0008	1.47	0.0085		21.19	15.57



Probe	Sr/Ca [mmol/mol]	Fehler 2 $\sigma$	U/Ca [ $\mu$ mol/mol]	Fehler 2 $\sigma$	SST NCEP	SST Sr/Ca	SST U/Ca
N2-5-35	9.240	0.0008	1.37	0.0092		23.18	19.31
N2-5-36	9.229	0.0007	1.38	0.0078		23.39	19.01
N2-5-37	9.172	0.0005	1.28	0.0066		24.45	22.84
N2-5-38	9.208	0.0009	1.36	0.0121		23.78	19.90
N2-5-39	9.254	0.0006	1.34	0.0080		22.92	20.47
N2-5-40	9.300	0.0006	1.40	0.0070		22.06	18.31
N2-5-41	9.219	0.0008	1.34	0.0065		23.58	20.49
N2-5-42	9.244	0.0009	1.37	0.0088		23.10	19.36
N2-5-43	9.150	0.0009	1.26	0.0075		24.86	23.59
N2-16P-1	9.385	0.0006	1.33	0.0051		20.47	20.83
N2-16P-2	9.350	0.0007	1.29	0.0050		21.12	22.31
N2-16P-3	9.283	0.0007	1.24	0.0069		22.38	24.33
N2-16P-4	9.327	0.0007	1.25	0.0061		21.55	24.06
N2-16P-5	9.273	0.0007	1.26	0.0072		22.56	23.62
N2-16P-6	8.733	0.0006	1.20	0.0064		32.67	26.15
N2-16P-7	9.405	0.0005	1.39	0.0068		20.09	18.55
N2-16P-8	8.926	0.0007	1.27	0.0069		29.06	23.19
N2-16P-9	8.715	0.0007	1.22	0.0078		33.01	25.18
N2-16P-10	9.300	0.0006	1.36	0.0065		22.06	19.70
N2-16P-11	9.216	0.0008	1.24	0.0071		23.64	24.24
N2-16P-12	9.317	0.0006	1.28	0.0066		21.74	22.76
N2-16P-13	9.376	0.0006	1.31	0.0069		20.64	21.59
N2-16P-14	9.441	0.0006	1.32	0.0079		19.43	21.13
N2-16P-15	9.378	0.0008	1.27	0.0067		20.59	23.39
N2-16P-16	9.129	0.0006	1.31	0.0058		25.26	21.82
N2-16P-17	9.314	0.0007	1.32	0.0069		21.80	21.26
N2-16P-18	9.226	0.0007	1.29	0.0066		23.44	22.62
N2-16P-19	9.209	0.0006	1.32	0.0071		23.76	21.30

### 10.3 TIMS-Messungen des hausinternen Korallen-Standards

Datum	Sr [mmol/kg]	Fehler 2 $\sigma$	Datum	Ca [mmol/kg]	Fehler 2 $\sigma$	Sr/Ca [mmol/mol]	Fehler 2 $\sigma$
13.02.96	82.562	0.003	12.02.96	9366.9	1.0	8.8141	0.0010
18.02.96	82.557	0.003	17.02.96	9363.3	0.8	8.8171	0.0008
10.03.96	82.556	0.002	09.03.96	9365.3	0.8	8.8151	0.0008
16.03.96	82.561	0.003	15.03.96	9366.2	0.8	8.8148	0.0008
17.03.96	82.554	0.003	16.03.96	9364.6	0.7	8.8156	0.0008
06.04.96	82.555	0.003	04.04.96	9366.7	0.8	8.8137	0.0008
06.04.96	82.562	0.002	04.04.96	9367.0	0.7	8.8142	0.0007
15.04.96	82.547	0.002	14.04.96	9364.0	0.8	8.8154	0.0008
06.05.96	82.551	0.003	06.05.96	9365.7	0.9	8.8141	0.0009
07.07.96	82.569	0.013	07.07.96	9367.4	0.8	8.8144	0.0016
13.07.96	82.550	0.005	12.07.96	9365.8	0.7	8.8140	0.0008
30.08.96	82.554	0.002	29.08.96	9366.3	0.6	8.8140	0.0006
15.09.96	82.569	0.003	14.09.96	9366.2	0.7	8.8156	0.0007
24.09.96	82.557	0.002	24.09.96	9367.6	0.9	8.8131	0.0009
07.10.96	82.551	0.003	06.10.96	9365.2	1.2	8.8147	0.0012
14.10.96	82.545	0.003	13.10.96	9367.0	0.7	8.8123	0.0008
14.10.96	82.565	0.002	17.10.96	9366.5	0.7	8.8149	0.0007
29.11.96	82.561	0.003	29.11.96	9366.1	0.6	8.8149	0.0007
15.12.96	82.575	0.002	15.12.96	9366.6	0.7	8.8159	0.0007
10.01.97	82.560	0.003	09.01.97	9366.6	0.8	8.8143	0.0008
17.01.97	82.565	0.003	16.01.97	9367.5	0.7	8.8139	0.0007
09.02.97	82.577	0.002	07.02.97	9366.9	0.7	8.8158	0.0008
02.04.97	82.568	0.002	02.04.97	9368.0	0.5	8.8138	0.0006
05.04.97	82.573	0.003	04.04.97	9367.1	0.5	8.8152	0.0005
08.04.97	82.554	0.002	08.04.97	9366.5	0.6	8.8138	0.0006
08.04.97	82.559	0.003	08.04.97	9367.0	1.0	8.8138	0.0010
08.04.97	82.566	0.002	08.04.97	9367.0	1.1	8.8145	0.0010
13.05.97	82.561	0.003	13.05.97	9367.3	0.5	8.8138	0.0005
19.05.97	82.561	0.003	18.05.97	9366.4	0.7	8.8146	0.0007
01.06.97	82.555	0.002	31.05.97	9363.1	0.5	8.8171	0.0005
05.06.97	82.560	0.002	05.06.97	9365.2	0.6	8.8157	0.0006
14.06.97	82.559	0.003	13.06.97	9367.0	0.5	8.8138	0.0005
24.06.97	82.551	0.003	23.06.97	9367.6	0.5	8.8123	0.0006
08.07.97	82.551	0.003	07.07.97	9367.2	0.5	8.8128	0.0005
10.08.97	82.551	0.002	09.08.97	9366.4	0.5	8.8136	0.0005
11.09.97	82.573	0.007	11.09.97	9366.3	2.0	8.8160	0.0020
18.09.97	82.547	0.009	18.09.97	9366.3	0.6	8.8132	0.0011
10.10.97	82.571	0.003	08.10.97	9367.0	0.4	8.8151	0.0005
10.10.97	82.564	0.003	08.10.97	9367.0	0.5	8.8144	0.0006
04.11.97	82.547	0.004	04.11.97	9366.6	1.0	8.8129	0.0010
05.11.97	82.577	0.004	05.11.97	9366.3	0.9	8.8163	0.0009
06.11.97	82.562	0.005	06.11.97	9367.0	1.0	8.8141	0.0011
10.11.97	82.550	0.004	10.11.97	9365.6	0.6	8.8142	0.0007
23.11.97	82.548	0.003	22.11.97	9364.8	1.0	8.8147	0.0010
25.11.97	82.539	0.005	24.11.97	9366.6	0.8	8.8121	0.0009
26.11.97	82.553	0.004	26.11.97	9365.5	1.9	8.8146	0.0019
15.12.97	82.544	0.003	14.12.97	9365.3	0.7	8.8138	0.0007
18.01.98	82.570	0.004	18.01.98	9367.1	0.8	8.8150	0.0009
Mittelwert	82.56			9366		8.814	
2 $\sigma$ [%]	0.022			0.023		0.025	

Datum	U [μmol/kg]	Fehler 2σ	Datum	Ca [mmol/kg]	Fehler 2σ	U/Ca [μmol/mol]	Fehler 2σ
17.09.96	10.28	0.17	14.04.96	9364.0	0.8	1.10	0.018
17.09.96	10.07	0.05	06.05.96	9365.7	0.9	1.08	0.006
18.09.96	10.25	0.03	07.07.96	9367.4	0.8	1.09	0.004
26.09.96	10.29	0.05	29.08.96	9366.3	0.6	1.10	0.005
06.11.96	10.10	0.05	14.09.96	9366.2	0.7	1.08	0.005
14.11.96	10.12	0.05	24.09.96	9367.6	0.9	1.08	0.005
16.11.96	10.11	0.06	06.10.96	9365.2	1.2	1.08	0.006
01.12.96	10.06	0.05	13.10.96	9367.0	0.7	1.07	0.005
16.12.96	10.09	0.05	17.10.96	9366.5	0.7	1.08	0.006
11.01.97	10.19	0.06	29.11.96	9366.1	0.6	1.09	0.006
18.01.97	10.24	0.05	09.01.97	9366.6	0.8	1.09	0.005
18.01.97	10.07	0.06	16.01.97	9367.5	0.7	1.08	0.006
08.04.97	10.16	0.05	08.04.97	9366.5	0.6	1.08	0.005
08.04.97	10.18	0.06	08.04.97	9367.0	1.0	1.09	0.007
08.04.97	10.29	0.03	08.04.97	9367.0	1.1	1.10	0.003
02.05.97	10.06	0.22	01.05.97	9366.4	1.1	1.07	0.024
14.05.97	10.29	0.05	13.05.97	9367.3	0.5	1.10	0.005
20.05.97	10.27	0.05	18.05.97	9366.4	0.7	1.10	0.005
01.06.97	10.23	0.06	31.05.97	9363.1	0.5	1.09	0.007
06.06.97	10.31	0.05	05.06.97	9365.2	0.6	1.10	0.005
14.06.97	10.06	0.05	13.06.97	9367.0	0.5	1.07	0.005
25.06.97	10.20	0.04	23.06.97	9367.6	0.5	1.09	0.004
08.07.97	10.24	0.04	07.07.97	9367.2	0.5	1.09	0.004
11.07.97	10.23	0.04	09.08.97	9366.4	0.5	1.09	0.004
11.09.97	10.04	0.09	11.09.97	9366.3	2.0	1.07	0.010
10.10.97	9.98	0.05	08.10.01	9367.0	0.4	1.07	0.004
10.10.97	10.01	0.06	08.10.01	9367.0	0.5	1.07	0.004
04.11.97	10.11	0.10	04.11.01	9366.6	1.0	1.08	0.011
05.11.97	10.13	0.07	05.11.01	9366.3	0.9	1.08	0.007
06.11.97	10.11	0.08	06.11.01	9367.0	1.0	1.08	0.009
07.11.97	10.09	0.13	06.11.01	9367.0	1.0	1.08	0.014
28.02.98	10.14	0.12	06.11.01	9367.5	0.8	1.08	0.013
Mittelwert	10.2			9366		1.08	
2σ [%]	1.8			0.021		1.8	

## Lebenslauf

27.09.1964	geboren in Wolgast
1971 - 1977	Johannes-R.-Becher-Oberschule in Eisenhüttenstadt
1977 - 1981	Ernst-Thälmann-Oberschule in Greifswald
1981 - 1984	Berufsschule Max-Reichpietsch in Greifswald Abschluß: Elektronikfacharbeiter mit Abitur
11/1984 - 11/1987	Wehrdienst in der NVA, Volksmarine in Dranske (Rügen)
01/1988 - 07/1988	Betriebspraktikum im VEB Erdöl-Erdgas Grimmen
09/1988	Aufnahme des Studiums der Geologie an der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald  Vordiplomprüfung in den Fächern Geologie-Paläontologie, Mineralogie-Petrologie, Mathematik, Chemie
04/1991	Studienortwechsel an die Georg-August-Universität Göttingen
04/1995	Diplomprüfung in den Fächern Allgemeine Geologie, Historische und Regionale Geologie, Angewandte Geologie, Mineralogie Titel der Diplomarbeit: Haupt- und Spurenelemente in Jahrringen von Eichen ( <i>Quercus robur</i> L.) – Möglichkeit einer Immissions-Chronologie?
11/1995	Beginn der Arbeiten zur vorliegenden Dissertation am Geochemischen Institut der Universität Göttingen

## **Danksagung**

Prof. Dr. A. Eisenhauer danke ich für die Vergabe des Themas, sein stets reges Interesse am Fortgang und den Ergebnissen der Arbeit sowie für die zahlreichen konstruktiven Diskussionen.

Prof. Dr. B. T. Hansen danke ich für die Übernahme des Korreferates sowie für sein Interesse, daß er dieser Arbeit während der gesamten Zeit entgegenbrachte.

Bei Dr. G. A. Heiss vom GEOMAR in Kiel und Dr. H. Kuhnert von der Universität Bremen möchte ich mich herzlich für die Überlassung des Probenmaterials der La Réunion-Korallen bzw. der Proben vom Ningaloo Reef und von Abrolhos Island bedanken sowie für die zahlreichen unentbehrlichen Informationen über die Proben und Probenlokationen.

Prof. Dr. W.-Chr. Dullo vom GEOMAR sowie Dr. Gilbert F. Camoin vom CEREGE in Aix-En-Provence Cedex, Frankreich danke ich für die spontane Hilfe bei der Beschaffung der Meerwasserproben bei La Réunion. Hierbei bin ich ebenfalls Christian Jacquet aus La Réunion zu Dank verpflichtet, der die sorgfältige Probenahme durchführte.

Frank Dorendorf und Thomas Tütken sei für die stete Diskussionsfreude gedankt und gleichermaßen für die äußerst angenehme Arbeitsatmosphäre, die mit ihnen als Zimmerkollegen entstand.